



Résolution de problèmes directs et inverses en électromagnétisme. Approche expérimentale

Pierre Sabouroux

► To cite this version:

Pierre Sabouroux. Résolution de problèmes directs et inverses en électromagnétisme. Approche expérimentale. Physique [physics]. Université de Provence - Aix-Marseille I, 2006. tel-00358355

HAL Id: tel-00358355

<https://theses.hal.science/tel-00358355>

Submitted on 3 Feb 2009

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Université de Provence



Habilitation à Diriger les Recherches

Pierre SABOUROUX

*Résolution de problèmes directs et inverses en électromagnétisme.
Approche expérimentale.*

Soutenue le 11 septembre 2006

Membres du jury:

Walid TABBARA	Professeur à l'Université de Paris VI	Supélec LSS - Orsay
M'hamed DRISSI	Professeur à l'INSA de Rennes	IETR, Rennes
Alain REINEIX	Directeur de Recherches CNRS	XLIM, Limoges
Rachid BOUCHAKOUR	Professeur à l'Université de Provence	L2MP, Marseille
Claude AMRA	Directeur de Recherches CNRS	Institut Fresnel, Marseille
Christophe LE NILIOT	Professeur à l'Université de Provence	IUSTI, Marseille

Institut Fresnel
Equipe Sondages ElectroMagnétique et Optique

*Une confrontation permanente entre théorie et expérience est une condition nécessaire
à l'expression de la créativité.*

Pierre Joliot

La connaissance s'acquiert par l'expérience, tout le reste n'est que de l'information.

Albert Einstein

à Catherine,

à Claire,

à Antoine,

Merci

Remerciements

Mon arrivée à l'Université de Provence est le fruit d'une rencontre qui eu lieu en juillet 1993 avec Roger DELEUIL. Je tiens à lui exprimer tous mes sincères remerciements pour m'avoir initié à cette fonction d'enseignant chercheur à l'Université et de m'avoir toujours soutenu dans les années qui suivirent. Mes débuts ont aussi été grandement facilités grâce à l'aide constante de Roger TEYSSIERE qui jamais n'hésita à me rendre service lorsque j'en avais besoin. Son soutien fut constant. Je lui exprime ma profonde gratitude.

Je souhaite maintenant remercier l'ensemble des membres de mon jury qui ont bien voulu consacrer un peu de leur précieux temps pour se pencher sur mon travail. Ainsi, je remercie Walid TABBARA, M'hamed DRISSI et Alain REINEX pour avoir accepté d'être rapporteur. Je les remercie aussi pour les nombreuses discussions que nous avons pu avoir depuis de longues années au détour d'une réunion scientifique ou d'un moment de détente après une journée de congrès. Ils m'ont toujours soutenu, même dans les moments de doutes que j'ai pu traverser. Je remercie aussi Claude AMRA, directeur de l'Institut Fresnel, d'avoir accepté de me donner un peu de son temps précieux pour me guider dans ce travail de préparation de cette habilitation à diriger les recherches. Je remercie aussi Rachid BOUCHAKOUR pour avoir été rapporteur local à l'université de Provence. Enfin, Christophe LE NILIOT, a accepté de participer à ce jury sans être spécialiste des hyperfréquences mais surtout pour apporter une vision d'un homme de terrain en physique expérimentale.

Il est bien évident, que l'ensemble de ce travail n'existerait certainement pas si je n'avais pas reçu le soutien des membres de l'équipe du laboratoire et plus précisément de l'équipe SEMO. Je leur exprime mes sincères remerciements. Je tiens aussi à exprimer mes vifs remerciements à tous les étudiants qui ont participé de près, voir de très près, ou de loin à l'obtention des résultats présentés dans ce mémoire.

Je ne peux pas, simplement, effectuer une liste exhaustive des personnes à qui je pourrais adresser mes remerciements car cette liste serait longue, voire très longue et j'en oublierais fatalement. Dans ces conditions, et pour éviter un regrettable oubli, je ne procèderai pas à l'établissement d'une telle liste. Ainsi, quiconque se sent concerné par mes travaux, qu'il soit assuré de ma profonde sympathie et qu'il accepte mes sincères remerciements pour son aide et ses encouragements.

Je remercierai Fabienne PICOLLET qui me donna un sérieux coup de main au début de cette aventure qui est l'écriture d'un tel mémoire.

Enfin, je réserve mes dernières lignes pour remercier mes proches et surtout mes très proches. Catherine, Claire et Antoine m'ont toujours entouré, encouragé et surtout supporté dans ces périodes de préparation en plus de leurs activités intenses de cette année. Jamais je ne trouverai des mots suffisants pour les remercier... Cette année 2006 restera longtemps dans nos mémoires comme une année particulière... Je leur dédie de tout mon cœur ce travail.

Table des matières

Curriculum Vitae	4
Introduction Générale	6
Volet enseignement	12
1. Implications pédagogiques	12
Implications dans la Formation Initiale	
Implications dans la Formation continue	
Résumé synthétique des enseignements dispensés	
2. responsabilités collectives	16
Organisations de manifestations scientifiques.	
Participation à des instances d'évaluation	
Participation à des organismes	
Volet Recherche	20
1. Rayonnement indirect : Etudes de la diffraction électromagnétique par des objets.	
1.1. Configuration monostatique : cas de la rétrodiffusion	20
Procédure expérimentale de la détermination de la SER	
Autre application de la configuration monostatique : étude d'un biréseau parfaitement conducteur	
<u>Article 1 : Compte rendu de l'Académie des Sciences, 1999</u>	28
1.2. configuration multi-statique	34
Développement du problème direct de diffraction : Application à une sphère.	
Application des mesures multi-statiques à l'étude d'un modèle macroscopique de particule de suie.	
<u>Article 2 : Journal of Quantitative Spectroscopy an Radiative Transfer, 2006</u>	44
Application aux problèmes inverses de diffraction.	62
<u>Article 3 : Inverse Problem, 2005</u>	68
2. Rayonnement direct : modélisations et caractérisations d'antennes	84
2.1. Validation du protocole expérimental de la mesure d'antenne : application au test d'une antenne aéroportée.	85
2.2. Modélisation et caractérisations d'antennes utilisant des métamatériaux	86
<u>Article 4 : Optic Communications, 1999</u>	88
<u>Article 5 : Physical Review Letters, 2002</u>	96
Articles de presse relatifs à la parution de l' <u>Article 5</u>	102

2.3	Introduction aux systèmes antennaires multicapteurs	110
3.	Détermination des caractéristiques électromagnétiques de matériaux.	111
	Article 6 : <i>Revue des Electriciens et des Electroniciens</i> , 2005	114
4.	Perspectives, ouvertures vers des thématiques émergentes	122
5.	Encadrement de la recherche, production scientifique et contractuelle	128
5.1.	Encadrement de stages	
	Stages de fin d'études	
	Mémoires de fin d'études Ingénieurs CNAM	
	Stages de DEA ou de MASTER 2 Recherche	
5.2.	thèses de Doctorat	129
5.3.	production scientifique et contractuelle	130
	Publications dans des Revues Internationales avec comité de lecture	
	Publications dans des Revues Nationales avec comité de lecture	
	Conférences en congrès internationaux avec actes	
	Conférences en congrès nationaux avec actes	
	Rapports de contrats	
	Conclusion générale	136
	<i>Bibliographie</i>	138
	Annexes :	
	Annexe A : Description de la base de mesure	144
	Annexe B : Principe de la mesure vectorielle de champs diffractés	148
	Annexe C : Configurations géométriques	154
	Annexe D : Caractérisation d'antennes	158

Curriculum Vitae

Curriculum Vitae

Pierre SABOUROUX

Etat Civil :

40 ans, marié, deux enfants.

n°INSEE 1 66 04 63 113 267

bureau : 04 91 28 83 53

adresse électronique : pierre.sabouroux@fresnel.fr

Fonction actuelle, formation et titres universitaires.

Maître de Conférences à l'Université de Provence depuis 1994

Octobre 2005 : obtention de la **Prime d'Encadrement Doctoral** et de **Recherche**.

Formation principale

1986 **DEUG Sciences Pour l'Ingénieur (SPI)**, Université de Pau,

1987 **Licence EEA**, Université de Pau

1988 **Maîtrise EEA**, Université de Bordeaux I

1989 **DEA** Université de Bordeaux I

1989-1992 **Doctorat**, Université de Bordeaux I

soutenue le 17 juin 1992

titre : *Modélisation et caractérisation de matériaux absorbants dans le domaine des hyperfréquences.*

Membres du jury

André Marie BOTTREAU	(DR CNRS)	<i>Président</i>
Paul COMBES	(Professeur)	Rapporteur
Serge TOUTAIN	(Professeur)	Rapporteur
Jean Paul PRUHLIERE	(CEA / CESTA)	Examineur
Christian CAMBON	(DCN, Toulon)	Examineur
Jean Paul PARNEIX	(Professeur)	Directeur de thèse

Principales étapes post formation.

- 1992** **Contrat industriel** au sein du Laboratoire PIOM jusqu'à la fin de l'année 1992,
- 1993** **Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche (ATER)**, à l'Université de Provence, UFR Science de la Matière (SM) à partir de septembre 1993,
- 1994** **Maître de Conférences à l'Université de Provence**
- 1995** Nommé à l'Institut Charles Fabry puis à POLYTECH – Microélectronique et Télécommunications.
- 1/09/1996** **Titularisation**
- 1/09/1999** **Maître de Conférences 1^{ère} Classe – 1^{er} échelon**
- 1/07/2002** **Maître de Conférences Classe Normale – 5^{ème} échelon**
- 1/05/2005** **Maître de Conférences Classe Normale – 6^{ème} échelon**

Organisations de manifestations scientifiques.

- **Animation d'un cas d'étude** (cas n°5) lors de l'Atelier Electromagnétique à Nice (JINA) en octobre 1998.
- Participation au **comité d'organisation** du congrès ETTC 2001 à Marseille, Juin 2001.
- Participation au **comité d'organisation** du congrès MMS à Marseille, Juin 2004.
- **Membre actif de la SEE** (Société de l'Electricité, de l'Electronique, des Technologies de l'Information et de la Communication).

Activités administratives et Instances d'évaluation:

- **Membre extérieur nommé** à la **Commission de Spécialistes** de la 63^{ème} Section à l'Université Paul Cézanne (Aix-Marseille III) depuis 1997.
- **Membre élu** de la **Commission de Spécialistes** 61-63^{ème} Section à l'Université de Provence depuis 1998. Actuellement vice-Président des Collèges B.
- **Membre nommé** en 2006 en tant représentant de l'Université de Provence au comité exécutif de PACA VALO.
- **Correspondant** Université de Provence du **MASTER M2 Professionnel**, Spécialité Compatibilité électromagnétique. Physique et Sciences de la Matière, co-habilité avec Aix-Marseille 1 et Aix-Marseille 3

Production Scientifique et contractuelle :

- 11 publications (Revue Internationale ou Nationales **avec** Comité de Lecture)
- 3 publications dans des revues sans comité de lecture
- 16 conférences internationales avec actes
- 18 conférences nationales avec actes
- 12 rapports de contrats

Introduction générale :

A un moment donné de notre vie professionnelle, nous sommes tous amenés à en faire une synthèse. Aujourd'hui, après une douzaine d'années de carrière scientifique au service de la recherche et de la formation, je me retrouve à faire ce constat. C'est dans ce contexte et dans le cadre de la demande d'une Habilitation à Diriger les Recherches que je me propose d'écrire dans ce mémoire un résumé agrémenté de quelques résultats de mes principales actions scientifiques.

Je vais tenter de retranscrire dans ce fascicule les grandes lignes de mes différents travaux de ces quelques douze ans depuis mon entrée à l'Université et qui ont toujours suivi une **ligne directrice** qui est la **physique expérimentale** dans le domaine des micro-ondes autrement appelées **hyperfréquences**. Le contexte scientifique générique est la **résolution des problèmes directs et inverses de diffraction en électromagnétisme**. A titre d'exemples, pour les problèmes directs nous pouvons citer la modélisation et la caractérisation de signatures radar de cibles plus ou moins complexes mais aussi l'étude de nouveaux concepts d'antennes, et pour les problèmes inverses, nous pouvons citer la localisation et la reconstruction de cibles inconnues.

Afin de résumer au mieux l'ensemble de mes travaux passés, présents et à venir, je vais articuler ce mémoire en deux volets distincts. Le premier volet retrace l'ensemble de mes **implications pédagogiques** ainsi que les **encadrements d'étudiants** en DEA ou MASTER 2 Recherches ou Professionnel, Mémoires CNAM ou encore en Doctorat. La partie enseignement est indissociable de ma partie recherche car je pense qu'il est fondamental pour un chercheur de rester proche des étudiants pour deux raisons majeures : pour transmettre ses pensées de chercheurs afin de faire perdurer la recherche et pour que ces chercheurs en formation motivent le chercheur senior. Dans ces conditions, je me suis toujours impliqué dans des **programmes de formation expérimentale** avec la mise en place de nouveaux thèmes étudiés et des infrastructures nécessaires. Le deuxième volet est dévolu à mes **travaux de recherches**, dans lequel, après un bref historique, je décris mes implications fortes dans différentes thématiques de recherches ainsi que quelques résultats obtenus. Nous terminerons ce volet par un paragraphe sur les perspectives, les thématiques émergentes avec les projets expérimentaux associés.

Enfin, je conclurai ce mémoire en faisant un résumé expliquant finalement ce constat scientifique intimement lié à la physique expérimentale qui a finalement abouti à l'obtention d'une **Prime d'Encadrement Doctoral** et de **Recherche** obtenue en octobre 2005.

Je reporte dans des annexes des informations techniques relatives à la base de mesure hyperfréquence qui a été utilisée pour obtenir l'ensemble des résultats présentés dans ce fascicule, ainsi que le principe même de la mesure vectorielle dans le domaine des hyperfréquences. J'ai délibérément préféré reporter dans ces annexes, tous les détails techniques de ces moyens expérimentaux pour éviter d'alourdir les descriptions des programmes de recherches que j'ai pu mener durant toutes ces années.

Avant de poursuivre mon mémoire, sans reprendre l'historique précis de la chambre anéchoïque dont certaines dates clefs sont indiquées dans l'annexe A, il est important de souligner que, du fait de **ma totale implication** dans le montage, puis le démarrage avec la constitution de tous les outils de pilotage de l'ensemble des positionneurs mécaniques et de la chaîne de mesure vectorielle, de la validation de ce nouveau moyen sur le site universitaire de Marseille, ma production scientifique n'est pas, en nombre, très élevée surtout dans la période comprise entre 1993 et 1996. J'ai ensuite recommencé à participer à quelques congrès. En 1998, suite à un éloignement géographique de la base de mesures hyperfréquences des centres universitaires de recherches et d'enseignement de Marseille Nord, je me suis occupé **du déménagement et du réaménagement** complet de la chambre anéchoïque de son site initial (11^{ème} arrondissement de Marseille) vers son site actuel (Grande Halle de IUSTI- Technopôle de Château Gombert-Marseille 13^{ème}). Cette opération fut complexe à gérer, tant au plan technique, qu'au plan financier. C'est vraiment à partir de cette nouvelle installation associée à l'arrivée d'un Ingénieur de Recherches CNRS, que j'ai pu enfin écrire et publier les résultats obtenus avec ce moyen expérimental au potentiel très vaste et extrêmement novateur. Mon investissement personnel complet dans cette base de mesures multi-applications comme je vais le montrer dans ce mémoire, est pleinement aujourd'hui en activité au sein du laboratoire et sert de moyen de référence pour effectuer des validations expérimentales de nombreuses études théoriques et modélisations de phénomènes physiques.

Avant de débiter le premier volet de ce mémoire, je souhaite souligner l'importance de la notion du **travail en équipe**. En effet, même si, comme je l'ai souligné dans le paragraphe précédent, dans les premières années **je me suis retrouvé seul aux commandes du banc expérimental**, je n'aurais jamais pu mener à bien l'ensemble de mes travaux sans **le soutien des collègues** avec qui j'ai partagé depuis ces commandes. Je citerai Frédéric PEZIN

Ingénieur de Recherches au CNRS avec qui j'ai fait équipe durant 2 ans à partir de 1998 et qui est reparti dans ses Flandres natales en 2000 et Jean Michel GEFFRIN, Ingénieur de Recherches au CNRS, qui nous a rejoint depuis 2003. C'est donc pour ces raisons que dans une grande partie du manuscrit, sera souvent fait l'emploi de la première personne du pluriel plus appropriée à décrire **un travail qui, somme toute, reste celui de toute une équipe.**

Volet enseignement

1- Implications pédagogiques

Pour bien comprendre mes implications en enseignement, quelques prérequis historiques sont nécessaires car le panorama des écoles d'ingénieurs a fortement évolué au sein de l'Université de Provence ces dix dernières années.

En effet, en 1994, ma nomination en temps que Maître de Conférences à l'Université de Provence au sein de la nouvelle école d'ingénieurs, l'Institut Charles Fabry, structure émanant de la formation universitaire en EEA, m'a permis de faire mes premiers pas dans l'enseignement supérieur. Finalement cette petite école, au sens du nombre d'étudiants par promotion (environ une vingtaine), a fusionné avec deux autres écoles pour donner naissance à l'Ecole Polytechnique Universitaire de Marseille (EPUM). Aujourd'hui, l'effectif des promotions est d'environ une cinquantaine d'étudiants par année dans le département Microélectronique et Télécommunications.

Implications dans la Formation Initiale :

Au sein de ces structures en constante évolution, en tant qu'expérimentateur dans l'âme, je me suis impliqué dans les enseignements expérimentaux comme les travaux pratiques d'électronique analogique et numérique ou de traitement de l'information (modulations, multiplexages, mélangeurs, ...), les stages ou encore les projets tutorés. Les étudiants concernés sont en deuxième ou troisième année du cycle ingénieur.

Etant un acteur majeur dans l'animation des séries de travaux pratiques d'électroniques de l'école, je me suis occupé en 1999, de la première phase de rénovation des salles de travaux pratiques. Ce projet de rénovation regroupant l'évolution des thèmes pédagogiques abordés et des choix des nouveaux appareils envisagés, s'est accompagné de la rénovation totale des locaux. A l'issue de ces rénovations, cette nouvelle salle a servi d'exemple pour les autres phases de rénovation des autres salles de travaux pratiques du département. Il est aussi important de souligner l'importance des budgets qui ont été nécessaires et alloués par l'université à cette rénovation (environ 500 kF). Aujourd'hui, ces salles de travaux pratiques sont utilisées à leur maximum pour former dans les disciplines expérimentales les étudiants ingénieurs.

En deuxième année, je m'occupe des travaux pratiques regroupés en deux grandes séries aujourd'hui appelé Télécom 1 & 2. Dans la première série sont abordés les thèmes relatifs au filtrage analogique, à l'étude d'un mélangeur équilibré à diodes, à l'étude d'une boucle à verrouillage de phase (PLL) et de certaines de ses applications (démodulation de fréquence, synthèse de fréquence), à la modulation d'amplitude, aux conversions analogique-numérique et numérique-analogique et enfin à l'analyse spectrale analogique. La seconde série aborde les principes des multiplexages fréquentiel et temporel, des modulations numériques et de la synthèse de filtres.

En troisième année, je me suis particulièrement occupé à mettre en place un enseignement des hyperfréquences avec une orientation très expérimentale. Au cœur de cet enseignement je dispense un cours traitant des antennes en général, des sources hyperfréquences et de la propagation hertzienne. Cet enseignement est associé à des séances pratiques pour faire l'apprentissage de techniques spécifiques utilisées dans les télécommunications comme l'analyse de réseau, les mesures de caractéristiques d'antennes ou encore la caractérisation de composants micro-ondes comme des amplificateurs, des mélangeurs ou des coupleurs hybrides... Pour effectuer ces séances d'apprentissage des techniques expérimentales dans le domaine des hyperfréquences, de gros investissements ont été effectués par l'école : un analyseur de réseau vectoriel fonctionnant jusqu'à 20 GHz, un synthétiseur de fréquences fonctionnant jusque dans la bande L (3GHz), des analyseurs de spectres, des antennes (des antennes log-périodiques larges bandes et des dipôles) et composants micro-ondes souvent très onéreux. En parallèle à ces séances pratiques, j'encadre des projets tutorés. Les sujets sont variés mais le plus souvent liés à des besoins techniques de laboratoires ou industriels. Comme exemples de sujets abordés, je citerai l'étude d'un DRO (Dielectric Resonator Oscillator) à 10 GHz, l'étude d'un réseau d'antennes patchs rayonnants en bande L, la programmation d'Interfaces Homme Machine (IHM) sur des appareils comme des analyseurs de réseau, des analyseurs de spectres ou encore de synthétiseurs, la modélisation d'antennes complexes (cornets double "ridge") à l'aide de simulateurs électromagnétiques 3D (HFSS et CST Microwave Studio).

Ces enseignements étant très techniques et appliqués, régulièrement des étudiants viennent parfaire leur formation en effectuant des stages avec des durées comprises entre un et trois mois au sein de mon équipe au laboratoire¹. Dans une suite logique, j'ai suivi et

¹ Chaque année, un à deux étudiants viennent faire un stage généralement de un mois et demi. Dans ces conditions, comme je l'ai déjà mentionné précédemment, j'ai donc encadré une bonne douzaine de ces étudiants.

encadré certains de ces étudiants en stages industriels de fin de cycle ingénieur. Avec ces encadrements, outre l'aspect technique de leurs formations, je développe l'aspect méthodologie du suivi de stages avec la mise en place de plannings, de rapports d'avancement et de préparations d'exposés des travaux. Ces notions de méthodologie s'avèrent fondamentales pour acquérir un certain recul par rapport à leurs activités. Après l'obtention de leur diplôme, ils ont été recrutés par des sociétés de renom à des postes à responsabilités (Airbus, Siemens VDO, Eutelsat, Orange, Radiall, Gem+, ...)

En parallèle avec ces enseignements en école d'ingénieurs, je m'occupe d'une part d'un cours initialement dispensé dans un premier temps au DEA Rayonnement et Plasma puis, depuis deux ans au MASTER 2 Recherches (Rayonnement, Plasma et Astrophysique) de l'Université de Provence relatif au rayonnement de particules en mouvement et à une introduction à la radioastronomie. D'autre part, depuis deux ans, j'ai mis en place un cours au MASTER 2 Pro CEM de l'Université Paul Cézanne relatif à l'utilisation des antennes en Compatibilité ElectroMagnétique.

Implications dans la Formation continue :

Enfin durant plusieurs années (1995-2003), je me suis occupé de l'enseignement pratique de l'électronique en travaux pratiques en cours du soir au sein de l'Institut de la Promotion Supérieure du Travail, centre de formation continue possédant un agrément CNAM jusqu'en 2003. Ces travaux pratiques suivaient dans les grandes lignes ceux de l'école *ICF*. Suite à ce module d'enseignement pratique plusieurs étudiants m'ont demandé de préparer dans un premier temps leur examen probatoire² puis, pour certains d'entre eux, leur mémoire de fin de cycle Ingénieur CNAM qui se prépare suivant les cas entre un et deux ans au sein de mon équipe de recherches. J'ai donc encadré entièrement en stage de mémoire de fin d'études, trois de ces étudiants. Généralement le volume horaire dispensé en cours du soir au sein de l'IPST-CNAM représentait une centaine d'heures par an.

² L'examen probatoire inclus dans le cycle IPST-CNAM, consiste en une recherche bibliographique et technique sur un sujet technique donné et est sanctionné à partir d'un rapport et d'une soutenance orale. Nous sommes très rigoureux sur ce module d'enseignement, car ce travail permet d'acquérir une structure de travail de recherche stricte et rigoureuse qui est fondamentale dans une formation d'ingénieurs.

Résumé synthétique des enseignements dispensés

1993-1994 : ATER à l'Université de Provence (*192 heures annuelles*)

TD de Licence ès Sciences Physiques : Electromagnétisme.

TD de seconde année de DEUG Sciences et Structures de la Matière.

TP en 1^{ère} et 2^{ème} année de DEUG Sciences et Structures de la Matière.

1994-2006 Maître de Conférences à l'Université de Provence : Institut Charles Fabry puis POLYTECH – MT (*192 heures annuelles minimum*)

1994-2000 **TP** de 1^{ème} année (*environ 40 Heures par an*) : électronique analogique et numérique (amplificateurs opérationnels et ses applications, filtrage passif, étude des diodes et transistors, approche expérimentale de l'analyse spectrale)

2004-2006 **TP** de 2^{ème} année (*environ 96 Heures par an*) : électronique analogique et numérique, Transmission du signal (filtrage actif, PLL, VCO, analyse spectrale, CNA/CAN, multiplexages, mélangeur, modulations numériques).

1994-2002 **TD** de première année : Ondes et Matière (Module 2). Opérateurs vectoriels, lame à faces parallèles, rayonnement du doublet, rayonnement par une ouverture rectangulaire, propagation guidée dans le mode fondamental et dans un guide surdimensionné, détermination de la permittivité diélectrique.

2002-2006 **Cours** 3^{ème} Année : Antennes - Propagation hertzienne - Sources hyperfréquences (*40 Heures*) : Généralités sur les antennes, antennes filaires, ouvertures rayonnantes, antennes à projecteurs d'ondes, antennes plaquées, introduction à la synthèse d'antennes, bilan de puissance dans une liaison hertzienne, introduction aux antennes spatiales, phénomènes physiques atmosphériques, sources hyperfréquences de faibles puissances (DRO, résonateurs YIG, synthétiseurs) et fortes puissances (klystrons, magnétrons, amplificateurs de type TOP, ...).

Stage en 3^{ème} Année (*44 Heures*) : Stage expérimental hyperfréquence (analyseur de réseau, caractéristiques d'antennes, analyse du bruit de mesure, études des non-linéarités (amplificateurs hyperfréquences, mélangeurs))

- 1997-2004 DEA "Rayonnement et Plasma" : **Cours d'électromagnétisme** du Module 1, UFR Sciences de la Matière. (20 Heures). Rayonnement par des particules en mouvement dans le vide et dans la matière (rayonnement synchrotron, de freinage, cerenkov,...). Introduction à la radioastronomie.
- 2004-2006 MASTER **Physique et Sciences de la Matière** M2 Spécialité Recherche : Rayonnement, Plasmas et Astrophysique : **Cours** Rayonnement électromagnétique (UE1) (12 Heures).
- 2004-2006 MASTER Pro CEM (UE3) : **Cours** : introduction aux antennes pour des applications à la Compatibilité ElectroMagnétique (8 Heures)

2- Responsabilités Collectives

Organisations de manifestations scientifiques.

Outre mes activités de recherches et de mes implications dans les responsabilités des plates-formes expérimentales hyperfréquences et d'enseignement j'ai pris part à l'organisation de manifestations scientifiques suivantes :

- Animation d'un cas d'étude (cas n°5) lors de l'Atelier Electromagnétique à Nice (JINA) en octobre 1998.
- Participation au comité d'organisation du congrès *European Test and Telemetry Conference* (ETTC 2001) à Marseille au mois de Juin 2001.
- Participation au comité d'organisation du congrès *Mediterranean Microwave Symposium* à Marseille au mois de Juin 2004.

Participations à des instances d'évaluation et autres responsabilités

Depuis 1997, je participe à des commissions de spécialistes dans deux établissements universitaires de Marseille :

- **Membre extérieur nommé** de la **Commission de Spécialistes** de la 63^{ème} Section à l'Université Paul Cézanne (Aix-Marseille III).
- **Membre élu** de la **Commission de Spécialistes** 61-63^{ème} Section à l'Université de Provence (Aix-Marseille I).

- **Membre nommé** au comité exécutif de *PACAVALO*. Cet organisme a pour objectif de **mutualiser les ressources de valorisation de la recherche des six universités de la Région PACA** (Universités d'Aix-Marseille I, II et III (de Provence, de la Méditerranée et Paul Cézanne), de Nice, de Toulon, d'Avignon). Deux membres par université sont nommés par les présidents de chaque université, pour siéger au comité exécutif de cet organisme.
- **Président** du **Conseil Scientifique, Technique et Pédagogique** du Centre Commun de Ressources Microondes. Ce conseil regroupe 13 membres : un représentant de chaque organisme régional ou territorial (Conseil Général des Bouches du Rhône, Conseil Régional PACA, DRRT, Ville de Marseille (MPM)), des membres des universités de Provence et Paul Cézanne, du CNRS et enfin des industriels.
- **Correspondant** Université de Provence du **MASTER M2 Professionnel**, Spécialité Compatibilité électromagnétique. Physique et Sciences de la Matière, co-habilité avec Aix-Marseille 1 (Université de Provence) et Aix-Marseille 3 (Université Paul Cézanne ou UPCAM). Responsable UPCAM : Michel THOLOMIER.

Enfin, depuis quelques années, j'ai pris part à la Société de l'Electricité, de l'Electronique, des Technologies de l'Information (SEE) et de la Communication en devenant membre actif dans la région Sud-Est Méditerranée.

Volet Recherche

Volet recherche

Il est assez difficile de faire une liste exhaustive de toutes les thématiques de recherches que j'ai pu aborder durant ces années tant elles sont nombreuses. La grande variété de ces études menées au cours de ces quelques dernières années est intrinsèquement liée à la géométrie du banc de mesures qui a été installé dans sa première phase en 1996 puis réaménagé en 1998 dans son lieu actuel, le Technopôle de Château Gombert³. En effet, la pluridisciplinarité de ce système était un des objectifs majeurs de ce moyen expérimental. Elle est due principalement aux nombreux positionneurs de cibles et d'antennes et à la chaîne de mesures hyperfréquences associée. L'ensemble des résultats obtenus est réparti en trois grandes parties : l'étude de la diffraction en général par des cibles plus ou moins complexes, l'étude et la caractérisation d'éléments rayonnants, à savoir des antennes et enfin l'étude des caractéristiques intrinsèques électriques et magnétiques des matériaux. En ce qui concerne la partie relative à la diffraction en général, nous avons mené des études de signatures radar (ou **Surfaces Equivalentes Radar**), de diffraction multi-statiques d'objet bidimensionnels et tridimensionnels pour des applications de résolutions de problèmes directs et de problèmes inverses de diffraction électromagnétique. Du fait de l'importance de cette partie, nous débuterons donc par l'étude de la diffraction en général par des cibles canoniques ou complexes.

1. Rayonnement indirect : études de la diffraction électromagnétique par des objets.

La description de cette partie est liée intrinsèquement aux différentes géométries disponibles dans la base de mesure. Nous avons deux géométries principales : la géométrie monostatique et la géométrie multi-statique. Ces deux géométries sont décrites en détails dans l'Annexe C. dans ces conditions, nous aurons deux paragraphes distincts relatifs à ces deux configurations. Le premier traitera donc des applications de la configuration monostatique avec les mesures de diagramme de rétrodiffusion (cas particulier de la mesure de **Surfaces Equivalentes Radar**). Le second décrira les applications de la configuration multistatique.

1-1. Configuration monostatique : cas de la rétrodiffusion

la mesure de signatures radar autrement appelée **Surfaces Equivalentes Radar** (SER) ou *Radar Cross Section* (RCS) en anglais. Bien évidemment, la SER n'a pas de rapport direct avec la surface physique, surtout quand cette cible est traitée pour être discrète vis-à-vis des

³ L'historique de la base de mesure sphérique est repris en Annexe A.

ondes électromagnétiques (notion de furtivité). Avant de poursuivre, dans la présentation de résultats, quelques rappels sur la SER sont nécessaires. La SER correspond à un rapport entre le champ incident et le champs diffracté dans une direction particulière : la direction identique à celle du champ incident (configuration monostatique ; cas de la rétrodiffusion)⁴. La relation de base que l'on trouve dans la littérature [Cri, DiFr, Kno] exprimant la SER en fonction des champs incident et réfléchi s'exprime de la manière suivante : $\sigma = \lim_{r \rightarrow \infty} 4.\pi.r^2 \frac{|E_d|^2}{|E_i|^2}$. Cette

expression est à considérer lorsque la distance antenne cible est très grande. Dans ces conditions, la valeur du module du champ diffracté tend vers une valeur extrêmement faible. Dans le cas géométrique d'une configuration monostatique, Le rapport de puissance

s'exprime par la relation suivante $\frac{P_R}{P_E} = \frac{\lambda^2 . \sigma . G^2}{(4.\pi)^3 . r^4}$ où λ est la longueur d'onde, σ la SER de la

cible étudiée, G le gain de l'antenne utilisée [Dar] (antenne identique utilisée à l'émission et à la réception) et r la distance entre l'antenne et la cible. L'évaluation théorique de la SER revient à évaluer le champ électromagnétique que la cible diffuse sous l'effet du champ incident. Cette évaluation, comme tout problème en électromagnétisme, est basée sur la résolution des équations de Maxwell. Le choix de la méthode théorique repose sur deux critères majeurs relatifs à la cible : sa dimension caractéristique par rapport à la longueur d'onde utilisée et sa complexité géométrique. En effet, dans le cas où la dimension de la cible est petite ou de l'ordre de la longueur d'onde, des techniques classiques de résolution des équations de Maxwell (formulations différentielles ou intégrales) sont appliquées. En outre dans le cas de cibles canoniques, c'est à dire dont la géométrie peut être décrite simplement dans des référentiels classiques (cartésien, cylindrique, sphérique, ...) des méthodes basées sur des formalismes différentiels sont utilisées. Dans le cas contraire des méthodes numériques approchées sont alors mises en oeuvre. Par contre, lorsque la dimension caractéristique de la cible est grande devant la longueur d'onde, les méthodes numériques classiques ne fonctionnent plus du fait de l'accroissement d'inconnues liées à la discrétisation de la cible. Des méthodes asymptotiques issues de la théorie géométrique de la diffraction sont alors utilisées [Bou, Gra]. C'est le cas pour les calculs de cibles à l'échelle 1:1 d'aéronefs, de navires ...

⁴ Remarque : Dans un soucis de clarté du manuscrit, la description des différentes configurations géométriques de la base de mesure, notamment celle utilisée pour les mesures de SER, sont regroupées en Annexe C.

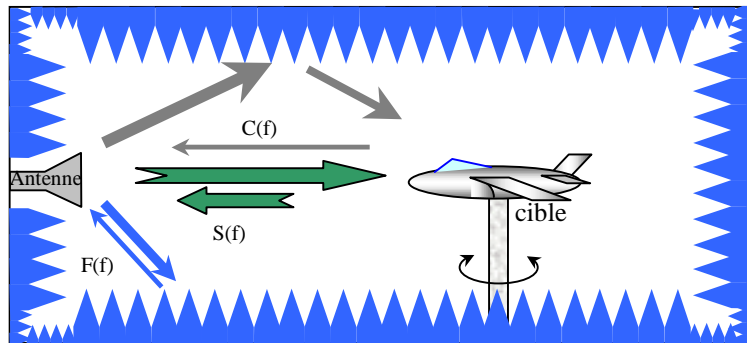
Procédure expérimentale de la détermination de la SER.

La cible pour laquelle la SER doit être déterminée, est placée sur un support "transparent" vis à vis des ondes électromagnétiques radar. La solution généralement utilisée est un mât en polystyrène expansé. Cette solution est utilisée d'ailleurs pour positionner des cibles de poids élevés de dimensions importantes comme des avions. Dans notre cas nous utilisons un mât en polystyrène de diamètre 20 cm. La détermination expérimentale de SER nécessite d'être par définition en zone de champ lointain [Bai], condition vérifiée grâce à la distance de 10 mètres entre les cibles et nos antennes. La configuration mise en œuvre pour ce type d'expérimentation est une configuration quasi-monostatique (cf ; Annexe C) et en utilisant la chaîne de mesure centrée sur l'utilisation d'un analyseur de réseau vectoriel en configuration sources multiples (synthétiseur principal et synthétiseur d'oscillateur local) avec les mélangeurs déportés (cf. Annexe B)

Le protocole de mesures de Surfaces Equivalentes Radar nécessite trois étapes : les deux premières sont liées à la mesure même du signal cherché à savoir le signal diffracté et la troisième étape est nécessaire dans le cas où on cherche des niveaux de SER référencés (dBm^2). La complexité de ce protocole est liée au fait que les niveaux des signaux recherchés

Figure 1 : principe de la superposition des contributions de la cible et de l'environnement.

Nous visualisons la contribution principale de réflexion directe sur la cible $S(f)$ et les contributions secondaires issues réflexions parasites issues d'une part d'une réflexion directe sur les absorbants ($F(f)$: fouillis), et indirect sur la cible ($C(f)$: couplage cible-environnement).



sont extrêmement faibles par rapport au niveau de l'onde incidente et que les signaux mesurés sont vectoriels. Typiquement, il n'est pas rare d'observer des écarts de plus de 30 dB entre le champ total (champ diffracté superposé au champ incident) et le champ diffracté seul (cf. figure 3). Cette superposition est liée d'une part aux couplages entre les deux antennes en position quasi-monostatique et aux multiples réflexions. Cette superposition est représentée schématiquement sur la figure 1.

Les valeurs complexes du champ rétrodiffusé sont obtenues à l'aide d'une soustraction vectorielle, ou soustraction complexe, des deux mesures : Champ mesuré avec la cible (champ total) moins le champ mesuré sans la cible (chambre vide). Les champs mesurés sont

décrits par un module et une phase. C'est alors que nous voyons apparaître le comportement intrinsèque de la réflexion par la cible. En procédant alors à une rotation de la cible dans le plan horizontal (azimutal), nous obtenons alors des diagrammes angulaires de diffraction. Les valeurs obtenues à l'aide de l'opération de soustraction vectorielle précédemment décrite, ne sont que relatives. En effet, aucune valeur de niveaux absolus n'est directement accessible avec la chaîne de mesures utilisée (Annexe B) car la mesure du coefficient de réflexion quasi-monostatique S_{21} résulte de la comparaison simple entre deux grandeurs : une référence a_1 et une grandeur de test b_2 . La grandeur de référence a_1 n'est pas nécessairement connue et de plus, ne peut pas être connue précisément. Ainsi, la grandeur b_2 ne peut être relative par rapport à a_1 . Dans ces conditions, pour obtenir les valeurs de surfaces équivalentes radar normalisées⁵, les valeurs mesurées sont référencées par rapport à une valeur obtenue avec une cible de référence pour laquelle le diagramme angulaire de réflectivité mesurée est connu analytiquement. Dans notre cas, la référence utilisée pour les types de cibles à caractériser est une plaque métallique rectangulaire (ou un sphère métallique) dont les dimensions ont été fixées pour être optimum.

Dans ces conditions, nous pouvons résumer que les résultats obtenus à l'aide du protocole expérimental décrit précédemment seront soit relatifs et pourront être normalisés soit par rapport à une valeur arbitraire (par exemple par rapport à un maximum), l'unité sera alors simplement le dB, soit absolus c'est à dire comparés à des résultats obtenus sur des cibles analytiquement connues, l'unité utilisée sera alors un décibel référencé (par exemple le dBm² du fait que la SER est homogène à une surface).

Relations linéaires :

Résultats relatifs : $\text{Diff}_{\text{rel}}(f, \theta) = \text{total}(f, \theta) - \text{vide}(f, \theta)$

Résultats absolus ou référencés : $\text{Diff}_{\text{ref}}(f, \theta) = \frac{\text{total}(f, \theta) - \text{vide}(f, \theta)}{\text{ref}(f, \theta) - \text{vide}(f, \theta)} \cdot \text{Surf}_{\text{th}}$

Où :

- f représente la fréquence d'étude et θ l'angle d'azimut de la cible
- Diff_{rel} et Diff_{ref} représentent les résultats relatifs aux champs diffractés relatifs ou référencés.
- $\text{total}(f, \theta)$, $\text{ref}(f, \theta)$ et $\text{vide}(f, \theta)$ représentent respectivement les champs mesurés en présence de la cible étudiée (total), en présence d'une cible de référence (ref) ou en l'absence de cible (vide)

⁵ Généralement les Surfaces Equivalentes Radar sont exprimées en dBm²

- $Surf_{th}$ représente la valeur de la surface équivalente radar théorique de la cible de référence (par exemple $\pi.a^2$ pour une sphère métallique de rayon a).

Dans une grande partie des cas, comme nous pourrons le voir dans les exemples, une simple mesure de la grandeur relative est suffisante.

Pour illustrer cette thématique, nous présenterons des résultats obtenus lors d'une collaboration avec le CNES qui avait pour but de caractériser un modèle à échelle réduite ($1/36^{ème}$) de l'étage principal cryotechnique d'Ariane V (diamètre 5.40m, longueur hors tout 31m). En effet, dans le programme Ariane V, un radar de poursuite aéroporté fonctionnant à la fréquence de 50 MHz avait été développé.

Durant ce programme, des prédictions numériques de la SER de cet étage suivant ses différentes positions angulaires par rapport à l'antenne radar avaient été effectuées au sein du CNES.

La maquette est constituée par un cylindre creux métallique (figures 2a et 2b) de 66 cm de long et de 15 cm de diamètre. La fréquence de l'étude est égale à 1.8 GHz. Le rapport entre le diamètre et la longueur d'onde est de 0.9. Pour rappel, le diamètre de l'étage cryotechnique d'Ariane V est de 5.40m ; la fréquence du radar aéroporté est égale à 50 MHz. Les extrémités du cylindre sont effilées avec une épaisseur de $5/10^{ème}$ de millimètres. Le cylindre peut être bouché soit par une plaque métallique plane, soit par une calotte sphérique. Les résultats présentés dans ce mémoire sont relatifs au cylindre bouché par des plaques métalliques planes. Pour des raisons de confidentialité, nous n'avons pas eu accès aux résultats des études numériques de la simulation de la SER de la maquette. Cependant, après de nombreuses discussions, nous avons pu obtenir un unique résultat relatif à la maquette du cylindre bouché dans le cas de la polarisation HH.

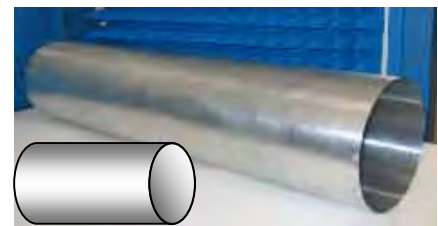


Figure 2a : Cylindre vide

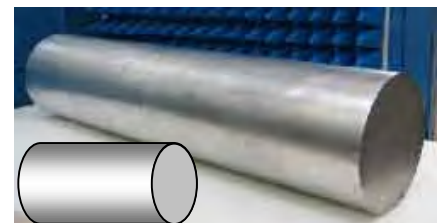


Figure 2b : Cylindre bouché par une plaque plane

La maquette est donc positionnée sur le mat en polystyrène à 10 mètres des antennes avec une configuration quasi-monostatique suivant le cas de polarisation horizontale HH : la polarisation du champ électrique est horizontale à l'émission et à la réception. Sur la courbe de la figure 3, nous avons comparé les niveaux des mesures directes du champ total, c'est à dire en présence de la cible sur le mat en polystyrène, de la chambre vide, c'est à dire sans la

cible, et enfin du champ diffracté résultant de la soustraction vectorielle des deux premières. Nous pouvons observer que le niveau du champ diffracté est très inférieur à ceux des champs mesurés (de -20dB à -40 dB en dessous). Il est important de souligner que, en fait, les mesures de SER sont donc très sensibles car elle sont faites "en aveugle" c'est à dire qu'il faut attendre d'avoir les deux champs mesurés pour diagnostiquer le champ diffracté (figure 3). Sur figure 4, nous avons superposé les résultats expérimentaux avec ceux issus de la simulation numérique qui nous a été mise à disposition. Les observations importantes se situent par rapport aux valeurs des niveaux dans les zones des réflexions spéculaires sur le coté du cylindre (angle d'azimut cible 0°) et sur les plaques planes (-90° et 90°). Les différences visibles entre ces deux zones angulaires sont principalement dues à des défauts d'alignement de la cible.

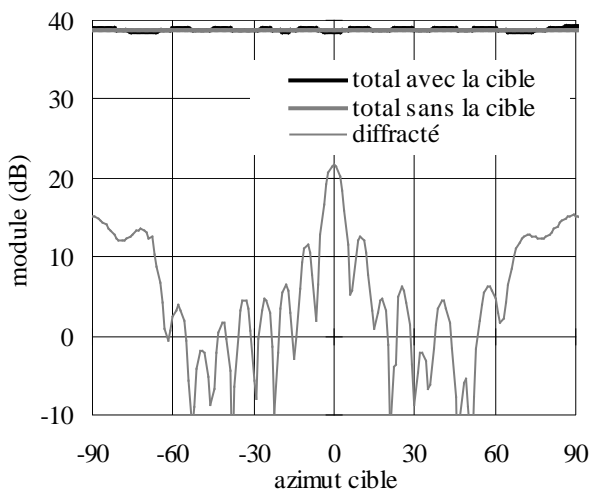


Figure 3 : Comparaison des niveaux des modules des champs totaux avec la cible, total sans la cible (chambre vide) et diffracté (soustraction vectorielle). Polarisation HH

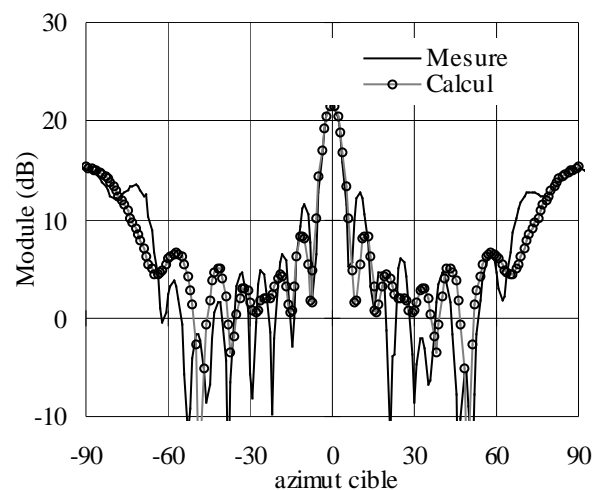


Figure 4 : Comparaison du module du champ diffracté avec le module du champ diffracté simulé. Polarisation HH

Durant toute ces activités de mesure de SER, j'ai encadré un étudiant en stage de DEA en 1996⁶. Son sujet était lié à la validation des mesures de signatures radar avec la mise en place de la procédure de mesure de SER. Ses expérimentations ont principalement porté sur cette cible du CNES tout en testant les différentes possibilités des positionneurs que nous venions d'installer dans la chambre anéchoïque.

⁶ Olivier Veyrunes : stage de DEA soutenu en juin 1996. Il a poursuivi avec la préparation d'une thèse chez France Télécom R&D.

Autre application de la configuration monostatique : étude d'un biréseau parfaitement conducteur.

Sur la base d'une configuration monostatique ou plutôt quasi-monostatique (Annexe C), et suivant un protocole expérimental similaire à celui utilisé pour déterminer des SER, nous avons mené une étude numérique et expérimentale de la réflectivité par un réseau bidimensionnel de cavités hémisphéroïdales parfaitement conductrices. Nous avons comparé les résultats expérimentaux obtenus aux résultats théoriques issus de la résolution des équations de Maxwell à l'aide d'une méthode différentielle [Str, Tor] associée à des conditions aux limites spécifiques. Cette méthode est largement décrite dans un article [Gaz1] issu d'un travail de thèse [Gaz2]. Nous avons regroupé les résultats obtenus dans un article dont une copie est insérée dans ce mémoire.

Article 1

**Expérimentation micro-onde sur la diffraction par des biréseaux
métalliques de cavités hémisphéroïdales**

Auteurs :

Gérard GAZOTY, Roger DELEUIL et Pierre SABOUROUX

Article publié dans le *C.R. Acad. Sci. Paris*, Série Ib, 1999

Expérimentation microonde sur la diffraction par des biréseaux métalliques de cavités hémisphéroïdales

Gérard GAZOTY, Roger DELEUIL, Pierre SABOUROUX

Équipe de radioélectricité, laboratoire d'optique électromagnétique (UPRES A N° 6079 du CNRS), centre scientifique de Saint-Jérôme, avenue Escadrille-Normandie-Niemen, 13397 Marseille cedex 20, France

(Reçu et accepté le 7 octobre 1999)

Résumé. L'étude théorique de la diffraction d'une onde électromagnétique plane par un biréseau plan parfaitement conducteur formé de cavités hémisphéroïdales a été réalisée et les premiers résultats numériques ont été récemment publiés. Afin de les valider complètement, on a conduit une expérimentation en microondes sur deux modèles de biréseaux relativement profonds en étudiant, en fonction de la longueur d'onde et sous incidence quasi-normale, les variations de l'efficacité dans l'ordre (0,0). Les résultats de nos mesures ont corroboré nos précédents travaux théoriques et numériques ouvrant la voie à une plus large exploitation des codes de calcul. © 1999 Académie des sciences/Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

réseau de diffraction / surface rugueuse / expérimentation en microondes

Microwave experimentation about electromagnetic diffraction from a metallic bigrating of prolate spheroidal cavities

Abstract. *The general theory of the diffraction of an electromagnetic plane wave from a bigrating of prolate spheroidal cavities hollowed in a perfectly conducting metallic plate has been carried out and numerical results were recently published. To valide these numerical results, an experimentation in microwave range with two deep bigratings has been realized. Numerical and experimental results, which concern the efficiency in the (0,0)-order versus the wavelength and for quasi-normal incidence are in a good agreement and allow us to extend the possibilities of our codes. © 1999 Académie des sciences/Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS*

diffraction grating / rough surface / microwaves experimentation

Dans une récente Note [Gazoty 1999], on avait présenté les premiers résultats numériques significatifs d'une étude théorique originale portant sur la diffraction électromagnétique par un réseau plan, métallique, croisé (ou biréseau), formé de cavités hémisphéroïdales. Le but de cette étude était d'obtenir une solution analytique pouvant servir de référence au traitement de la diffusion de la lumière

Note présentée par Pierre ENCRENAZ.

1287-4620/99/032701419 © 1999 Académie des sciences/Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS.
Tous droits réservés.

1419

par une surface métallique quasiment plane dont les *rugosités*, de *géométrie* relativement *simple*, pouvaient être caractérisées par leur *densité* (rapports b/A et b/B du demi petit axe b des cavités à leurs périodes spatiales A et B), et leur *profondeur* (rapport a/b des demi grand axe et demi petit axe du sphéroïde allongé générateur des cavités). Dans la mesure où les périodes A et B restent voisines de la longueur d'onde incidente λ , ce problème de diffraction ne peut bénéficier d'aucune approximation dans son traitement analytique qui repose sur une méthode différentielle exacte (méthode modale). D'autre part, parmi le nombre limité d'ordres de diffraction réels observés, on s'intéresse à l'ordre $(0,0)$ et, en particulier, à l'efficacité dans cet ordre, notée $\varepsilon_{\theta}(0,0)$, égale au rapport de l'énergie diffractée dans cet ordre à l'énergie incidente et qui représente la *réflectance* de cette structure rugueuse. Les premiers résultats numériques présentés alors soulignaient les effets de la *densité* et de la *profondeur* des *rugosités* sur la réflectance normale et leur validité reposait sur la vérification d'un certain nombre de critères numériques et physiques.

Le but de la présente Note est d'apporter un support expérimental à ce précédent travail en vue d'en étendre l'exploitation. Du fait de la grande sensibilité de la réflectance de tels biréseaux à la fréquence incidente et, surtout, à de faibles variations de la forme des cavités, cette expérimentation a été conduite dans le domaine des hyperfréquences (longueurs d'onde centimétriques) où il est possible d'usiner des modèles à grande échelle présentant un profil précis et un bon état de surface et qui, tout en comportant un nombre suffisant de cavités (une centaine) pour que le phénomène de diffraction d'ensemble soit bien constitué, n'aient pas des dimensions prohibitives (côtés n'excédant pas quelques décimètres) qui soient incompatibles avec les moyens expérimentaux en microondes du laboratoire (base de mesures en chambre anéchoïde fonctionnant de 200 MHz à 26,5 GHz).

Les deux structures réalisées comportent 9 rangées de 11 cavités distribuées selon deux directions orthogonales avec les périodes $A \equiv B = 36$ mm ce qui conduit à des panneaux de 396×324 mm² (figure 1) ; la première (notée Stc) est constituée de cavités d'excentricité moyenne ($e \approx 0,75$ soit un

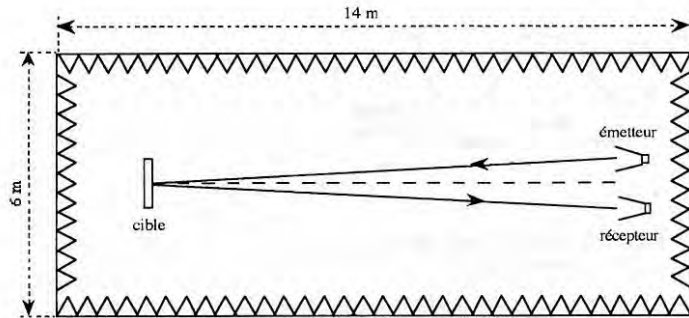


Figure 1. Les biréseaux sont formés de 9 rangées de 11 cavités, soit des panneaux de 396×324 mm².

Figure 1. The bigratings have 9 rows of 11 cavities, so the panel dimensions are 396×324 mm².

Figure 2. Disposition du biréseau et des cornets d'émission et de réception en chambre anéchoïque.

Figure 2. Geometry of the set-up.



rapport $a/b = 1,5$) et la seconde (notée Ste), est formée de cavités de plus forte excentricité ($e \neq 0,94$ soit un rapport $a/b = 3,0$). Les mesures ont été réalisées classiquement selon une procédure éprouvée [Deleuil 1969] en adoptant la disposition du goniomètre plan en configuration quasimonostatique avec des distances biréseau-aériens (d'émission et de réception) voisines de 10 m ; les longueurs d'onde de travail sont comprises entre 18 mm et 50 mm, ce qui donne un rapport $\lambda/A \in [0,50 ; 1,39]$ et entraîne un spectre diffracté assez riche puisqu'il peut passer de 9 ordres réels à 1 seul.

Concernant le dispositif expérimental, la source est un synthétiseur HP 83640 A, le récepteur est un analyseur de réseau HP 8510 C et les deux aériens sont des cornets large bande dont les axes principaux, presque confondus, sont horizontaux ; dans le cas particulier de la mesure de l'efficacité dans l'ordre (0,0), la bissectrice de ces deux axes se confond avec la normale au plan du biréseau, lequel est vertical et placé sur un positionneur azimutal (figure 2). L'ensemble de ces équipements est placé dans une vaste chambre anéchoïque faradisée qui assure des mesures de grandes qualités, comme cela a été prouvé récemment sur des cibles de plus faibles sections efficaces [Dalmas 1997]. Dans cet environnement, toute mesure consiste en une moyenne sur plusieurs passages en fréquence suivie d'un lissage des résultats ; quant à l'évaluation de l'efficacité dans l'ordre (0,0), elle s'obtient en effectuant une calibration avec soustraction vectorielle du bruit de la chambre comme donné par la relation :

$$\varepsilon_{ff}(0,0) = \frac{|E_{\text{réseau}} - E_{\text{chambre}}|^2}{|E_{\text{référence}} - E_{\text{chambre}}|^2} \quad (1)$$

où $E_{\text{référence}}$ représente la mesure du champ électrique réfléchi par un plan métallique de référence ayant mêmes dimensions que celles du biréseau.

Pour chacune des structures dont les profils sont indiqués sur les figures 3 et 4, on a tracé le graphe $[\lambda, \varepsilon_{ff}(0,0)]$ donnant la réflectance normale sur un intervalle couvrant presque 1,5 octave et contenant ainsi les deux transitions « 9 ordres - 5 ordres » et « 5 ordres - 1 ordre » au niveau desquelles des instabilités numériques sont à craindre. Sur la figure 5, qui correspond à la structure Ste, on peut comparer les résultats de nos mesures (courbe en pointillés) à ceux de nos précédents calculs (cercles noirs) et souligner l'accord très satisfaisant observé. La figure 6 correspond à un biréseau nettement plus profond ($a/b = 3,0$) pour lequel l'exploitation numérique requiert plus de vigilance ; on y observe encore un bon accord entre calculs et mesures bien que la rugosité soit maintenant élevée ($b/A \neq 0,28$ et $a/A \neq 0,83$). Ainsi, dans chaque cas, l'examen de la courbe d'efficacité qui, en elle-même, présente des variations assez amples, souligne la bonne correspondance entre calculs et mesures ; c'est là un résultat très positif qui, à la fois, souligne les qualités de la base expérimentale en microondes du laboratoire et, surtout, renforce les possibilités d'exploitation de notre

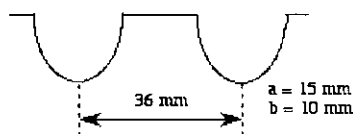


Figure 3. Vue en coupe de la structure Ste.

Figure 3. Ste-cross section.

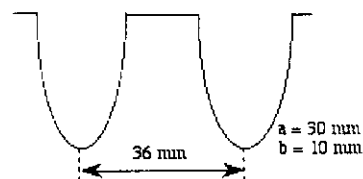


Figure 4. Vue en coupe de la structure Ste.

Figure 4. Ste-cross section.

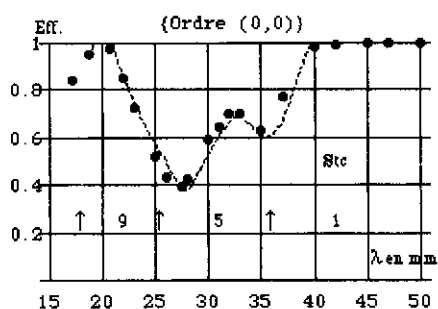


Figure 5. Comparaison entre les résultats numériques (points) et les mesures en microondes (courbe en pointillés).

Figure 5. Comparison between numerical results (points) and microwave experiments (dashing curve).

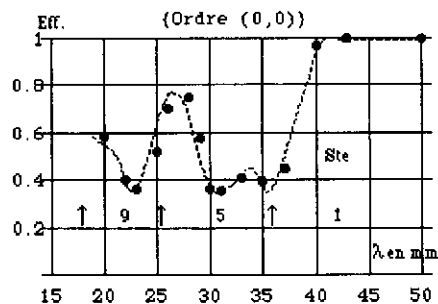


Figure 6. Comparaison entre les résultats numériques (points) et les mesures en microondes (courbe en pointillés).

Figure 6. Comparison between numerical results (points) and microwave experiments (dashing curve).

code numérique à des structures plus fortement rugueuses (cavités quasiment tangentes et profondes) qui seront étudiées dans des conditions plus larges d'incidence et de polarisation.

Références bibliographiques

- [1] Dalmas J., Deleuil R. et Sabouroux P., Mesures de signatures bistatiques radar de cibles complexes, Actes des Journées nationales Micro-ondes 97, Saint-Malo, session 6C3, 1997, pp. 604–605.
- [2] Deleuil R., Réalisation et utilisation d'un appareillage destiné à l'étude des dioptries irréguliers et des réseaux en ondes millimétriques, Optica Acta 16 (1) (1969) pp. 23–31.
- [3] Gazoty G. et Deleuil R., Diffraction d'une onde électromagnétique plane par un biréseau métallique plan formé de cavités hémisphériques, C. R. Acad. Sci. Paris 327, Série IIb (1999) 555–558.

1-2. Configuration multistatique

Un des objectifs majeurs de notre dispositif expérimental est de proposer des configurations géométriques jusqu'à lors non disponibles, à savoir des configurations multistatiques. La description de ces configurations multi-statiques est reprise en détails dans l'Annexe C. A l'inverse de la configuration monostatique utilisée dans le paragraphe 1.1, les directions de propagation des ondes incidentes et diffractées ne sont pas identiques. Nous avons alors deux antennes (une pour l'émission et une pour la réception) positionnées dans l'espace autour de la cible à caractériser suivant des angles quelconques. Un cas particulier est la configuration bistatique dans laquelle les deux antennes et le centre de la cible sont dans un même plan qui est généralement le plan horizontal (azimutal) ou éventuellement vertical (plan de site). Il existe quelques bases de mesures fonctionnant suivant des configurations bistatiques (base Cactus au CESTA [Cho], la base BaBi de l'Onéra [Gür], base de l'EMSL [For], ASBSMS [Cot]...). Cependant, extrêmement peu de bases proposent des configurations multistatiques. Dans ces conditions, nous avons un rôle exploratoire dans la mesure multistatique.

Avant d'aborder des études dans des configurations complexes, il était bien évident qu'il était nécessaire d'effectuer une première validation de notre nouveau ainsi que moyen de notre procédure. Pour procéder à cette validation, nous avons étudié numériquement et expérimentalement une cible de référence : un couple de sphère asymétrique. Les dimensions de cette cible sont visualisées sur la figure 5. La fréquence a été choisie telle que la longueur d'onde soit égale au rayon de la petite sphère soit 17.5 mm ($f = 17.14$ GHz).

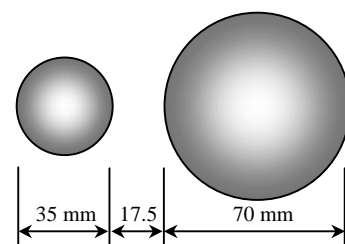


Figure 5 : couple de sphères asymétriques : photographie et dimensions

Pour expliquer le choix de cette cible, il faut resituer cette étude dans le contexte de l'époque. En fait cette cible avait été proposée comme cas d'étude lors de l'Atelier consacré aux SER organisé parallèlement aux congrès des JINA en 1992⁷ (Journées Internationales de Nice sur les Antennes). Le but de cet atelier était de valider des codes de calculs destinés à évaluer les

⁷ Les participants à cet atelier, SER 1992, étaient les acteurs principaux travaillant dans le domaine de la modélisation numérique des champs diffractés (Onéra, CEA, Dassault, Matra, Thomson CSF, ...). Ils souhaitaient confronter leurs résultats numériques à des résultats expérimentaux dans les cas où c'était possible.

champs électromagnétiques diffusés par des cibles réalistes complexes. Ce couple de sphères constituait une des cibles de référence. A l'issu de cet atelier, nous avons donc choisi de mesurer les champs diffractés par une telle cible. Après avoir regroupé des résultats théoriques [Dal1] nous en avons confronté certains à des résultats expérimentaux [Dal2]. L'approche théorique est développée autour d'un formalisme différentiel [Bru, Str].

Pour effectuer les caractérisations expérimentales de la diffraction par ce couple de sphères, le récepteur était fixe par rapport à la cible tandis que la direction d'émission décrivait une trajectoire circulaire autour de la cible dans le plan azimutal (plan horizontal). Seul la zone de diffusion arrière (ou rétrodiffusion) n'était pas accessible du fait de la gêne physique des deux antennes. Une exclusion mécanique à été réduite à environ 60° . Les deux cas de polarisation ont été étudiés : le cas Transverse Electrique (ou VV pour polarisation Verticale à l'émission et à la réception) et le cas Transverse Magnétique (ou HH pour polarisation Horizontale à l'émission et à la réception). Le protocole expérimental appliqué est similaire à celui mis en œuvre pour les mesures de SER et décrit dans le paragraphe 1.1, à savoir une soustraction vectoriel du champ à vide (sans la cible) du champ total (avec la cible). Le schéma de principe de la géométrie est repris sur la figure 6.

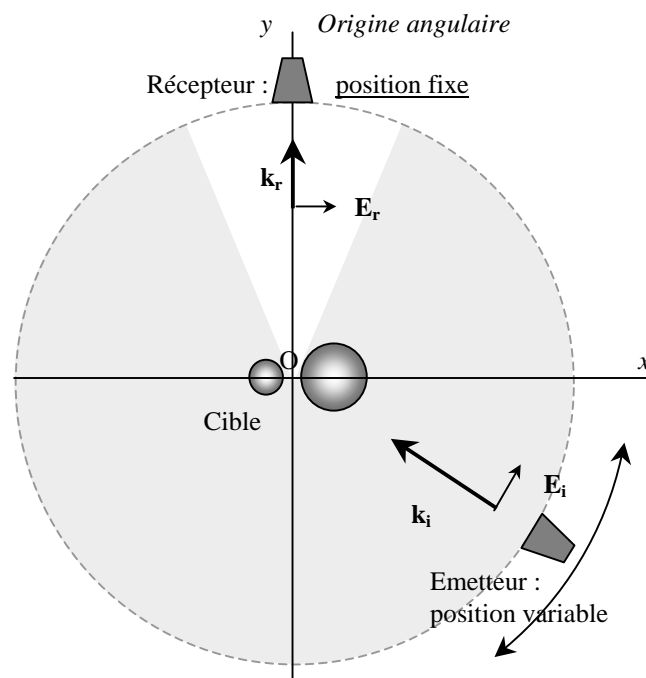


Figure 6 : configuration bistatique et visualisation angulaire : Cas TM ou HH

Nous regroupons les résultats théoriques et expérimentaux sur figures 7a et 7b suivant les deux cas de polarisation VV et HH. Ces courbes ont été présentées lors d'un congrès national, le Journées Nationales des Microondes, en 1997 dans lequel étaient regroupés la plupart des personnes ayant participé aux ateliers SER des JINA. Ils ont pu vérifier la rigueur

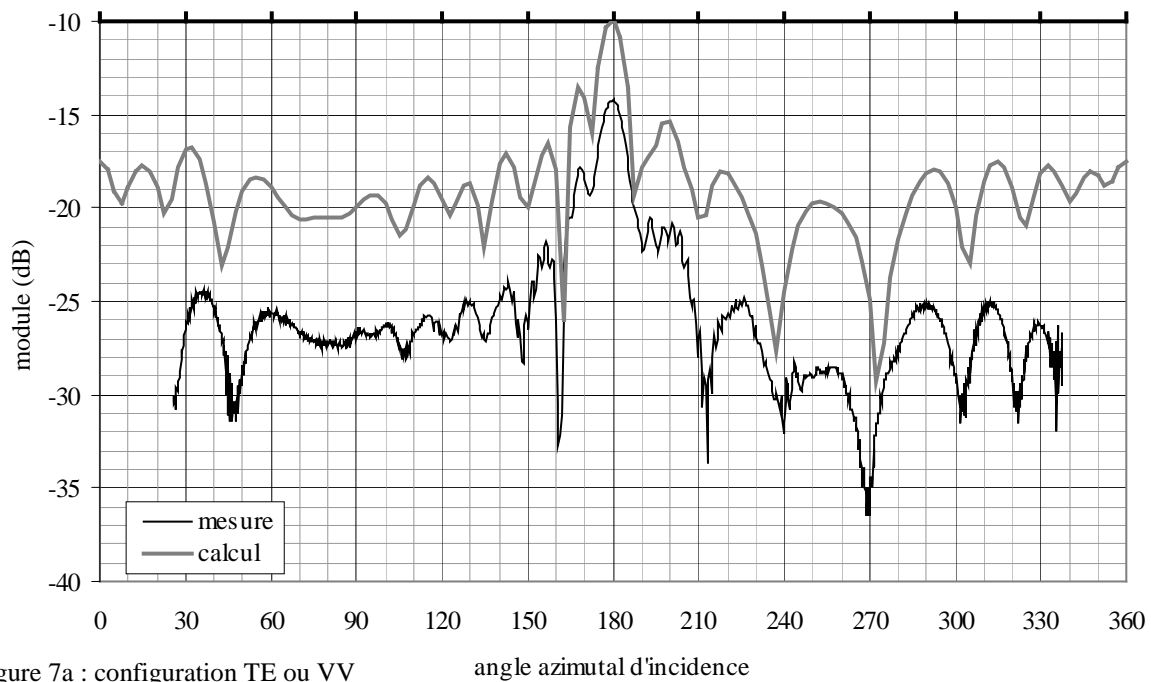


Figure 7a : configuration TE ou VV

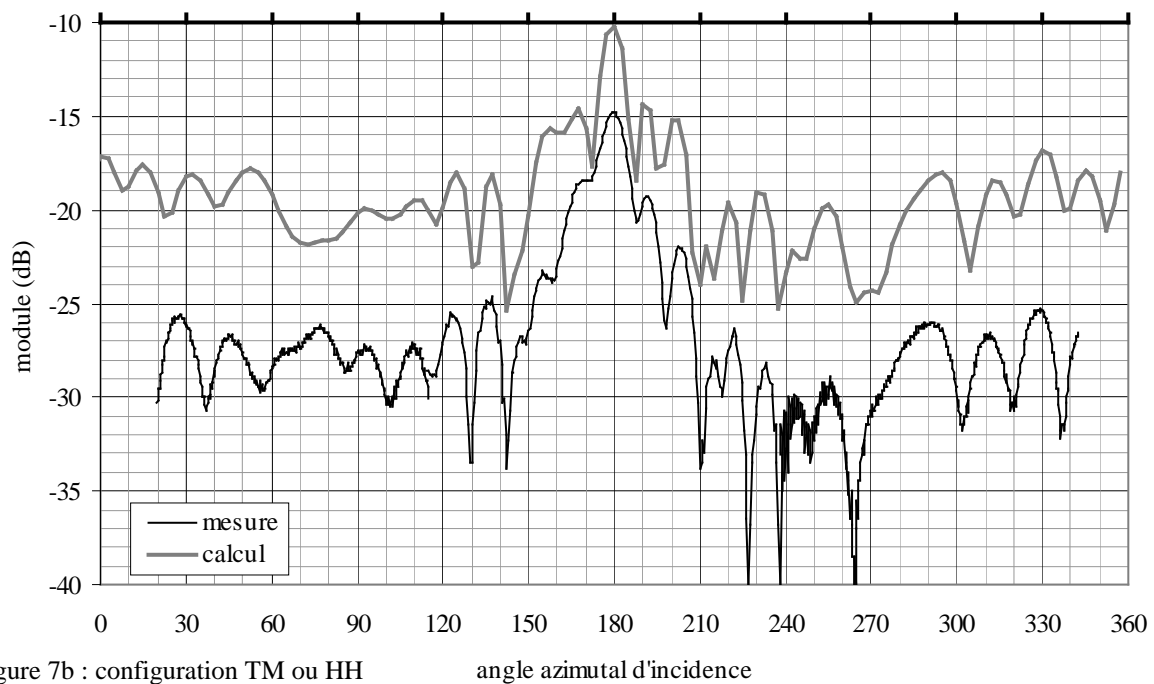


Figure 7b : configuration TM ou HH

des développements numériques ainsi que la qualité des mesures. A titre indicatif, les pas angulaires sont de 2.5° pour les calculs et 0.25° pour les mesures. La fréquence de l'étude est égale à 17.14 GHz.

Dans le contexte, les résultats étaient extrêmement prometteurs. En effet, c'était la première fois qu'une telle cible était mesurée dans cette configuration bistatique. La comparaison des résultats expérimentaux par rapport aux résultats théoriques montre une correspondance stupéfiante. Cependant, nous observons des différences, notamment de niveaux qui, à partir de leur compréhension, nous a amené à modifier par la suite le protocole ainsi que les conditions de mesures. Dans un premier temps, l'écart des niveaux entre la zone de diffusion avant (zone des 180°) et les zones latérales sont dues à des défauts manifestes d'alignement de la cible par rapport au référentiel (xOy). La rigueur de cet alignement sera une opération primordiale dans les évolutions du protocole expérimental. Dans un second temps, nous avons commencé à considérer la notion d'erreurs de dérive dans le temps. Du fait que cette étude ait été effectuée dans un régime monochromatique, le temps de mesure pour un balayage de zone angulaire, ne nécessitait qu'environ 30 minutes. La mesure de la chambre vide, c'est à dire en retirant la cible, était immédiatement faite après. Les effets de dérives, que l'on peut observer d'une manière relativement visible sur la figure 7a entre 190° et 210° , sont cependant limités car la durée de mesure est limitée. Cette affirmation sera vérifiée dans les mesures ultérieures qui nécessitent plusieurs heures pour effectuer une acquisition complète (multi-fréquence, multi-incidence, ...) pour lesquelles la prise en compte des dérives est incontournable. Nous reviendrons sur cette notion de dérive dans les paragraphes futurs.

Ainsi, nous avons une première fois validé notre procédure avec la présentation publique de nos résultats [34]. Les acteurs majeurs de la recherche sur la thématique modélisations et mesures de champs diffractés (Dassault, ONERA, CEA, Matra, Thomson CSF, ...) étaient présents à cette manifestation. Ils ont souligné largement la qualité des confrontations présentées. Nous pouvons dire aujourd'hui que notre position de spécialistes dans le domaine expérimental de la détermination des champs électromagnétiques rayonnés date de cette époque et que les fondements de cette thématique de recherche expérimentale dans ce domaine avaient été posés⁸. Nous avons alors défini deux axes pour orienter nos recherches, à savoir le premier axe lié à l'étude des **problèmes directs** de diffraction électromagnétique et le second axe lié à la résolution de **problèmes inverses** de diffraction en électromagnétisme. Nous allons développer maintenant ces deux axes.

⁸ Encore, aujourd'hui, nous sommes sollicités pour effectuer des caractérisations de cibles. D'ailleurs dans les semaines à venir, nous allons caractériser la signature radar d'une tête de périscope de sous-marin d'attaque.

Tout d'abord rappelons la dualité des problèmes Directs ou Inverses de diffraction (figure 8) ... Le problème direct de diffraction électromagnétique consiste classiquement à déterminer les expressions ainsi que les valeurs des champs électromagnétiques pour une cible donnée connue comme dans les cas cités dans les paragraphes précédents (cylindre

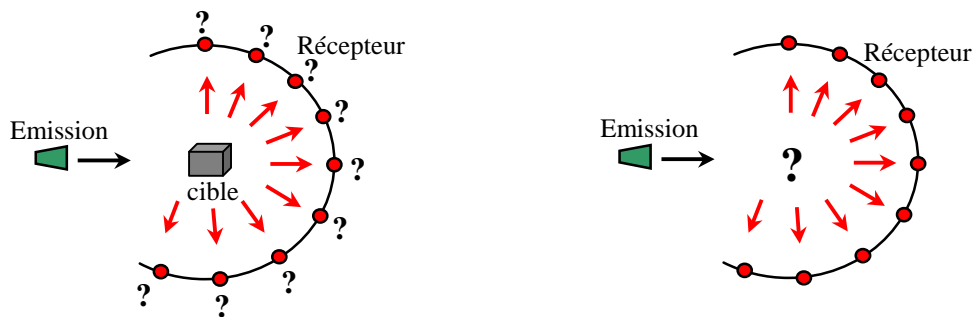


Figure 8 : schéma générique pour le problème direct de diffraction (figure de gauche) et pour le problème inverse (figure de droite). Les points d'interrogations localisent les inconnues

métallique, réseau bi-périodiques de cavités, couple asymétrique de sphères). Dans ces conditions, les inconnues sont bien identifiées à savoir les valeurs complexes (modules et phases) des champs diffractés. Dans ces conditions, il y a unicité de la solution à savoir que pour une cible donnée, il y aura une solution unique pour les champs. Par contre, pour les problèmes inverses de diffraction, les informations que l'on suppose comme connues, sont les valeurs des champs électromagnétiques diffractés tandis que les inconnues sont liées à la cible elle-même. Ces inconnues sont de plusieurs natures : le nombre d'éléments diffractants, la nature physique de ces éléments et enfin leur localisation dans l'espace... Ce problème inverse de diffraction est d'autant plus complexe que l'unicité de la solution n'existe pas : pour une valeur de champ électromagnétique donné, différentes cibles peuvent être à l'origine de ce champ. Cette difficulté, que nous ne rencontrons pas dans le cas des problèmes directs, nous oblige à maîtriser parfaitement les différents protocoles établis.

Développement du problème direct de diffraction : application à une sphère.

Comme nous l'avons indiqué précédemment, l'étude relative au couple de sphères métalliques a mis en évidence des erreurs liées principalement au positionnement de la cible sous test ainsi qu'à la dérive électronique de la chaîne de mesure. Pour identifier ces erreurs et optimiser notre protocole expérimental, nous avons considéré une cible plus conventionnelle, à savoir une sphère diélectrique. Pourquoi un tel choix ? En fait, le matériau choisi est du PMMA :



Figure 9 : sphère diélectrique de diamètre 50 mm

PolyMethyl MethAcrylate ou plus communément du Plexiglas. C'est un matériau bien connu chimiquement et surtout transparent à la lumière et donc aux faisceaux laser. La permittivité diélectrique égale à 2.5 est mesurée à l'aide de notre outil *EpsiMu* que je présenterai un peu plus tard dans ce mémoire. Les propriétés de transparence optique nous ont permis en associant la transmission des faisceaux laser au travers de la sphère transparente à la réflexion sur la face d'entrée, d'aligner d'une manière quasi-parfaite la cible dans le référentiel des positionneurs mécaniques. En observant les résultats aux cours des différentes campagnes de mesures, nous avons évalué les précisions nécessaires pour le positionnement à quelques dixièmes de millimètres ce qui fait couramment $\lambda/30$ à $\lambda/50$ suivant les longueurs d'ondes utilisées. En outre, les durées nécessaires pour des mesures avec un nombre de degrés de libertés accru (plusieurs direction d'incidence par rapport à la cible, augmentation de la plage de fréquence d'étude, ...) ayant fortement augmenté (d'environ une demi-heure, nous sommes passés à plusieurs heures) les dérives électroniques de la chaîne de mesure ont augmenté en proportion rendant quasiment inutilisable les fichiers de mesures brutes. Ces dérives portent principalement sur les termes de phase ; leur influence sur les termes d'amplitude étant relativement faibles. Nous observons des oscillations parasites qui masquent quasiment dans sa totalité les résultats. Pour palier à ces erreurs de dérives, nous avons effectué, dans le cadre d'un travail de thèse, une modélisation de ces phénomènes de dérives pour les corriger dans des opérations de post-traitements. Les développements de ces modèles de bruit seront décrit en détails dans deux documents (un article dans une revue et le mémoire de thèse). La correction principale s'effectue par minimisation de spectre spatial du champ diffracté⁹.

Nous présentons dans ce mémoire seulement des résultats représentatifs de ces opérations de prise en compte de ces erreurs de dérives. Nous choisissons des cas géométriques multi-statiques avec des angles de sites de 30°, 60° et 90° (figure 10a). Ce dernier cas est, nous le rappelons le cas particulier de la configuration bistatique. Les résultats obtenus pour les cas 30° et 60° sont, malgré les corrections effectuées bien plus bruités que celui obtenu avec un angle de site égal à 90° (figure 10c). En fait, pour comprendre l'origine de ces bruits résiduels, il faut bien visualiser sur un même graphique

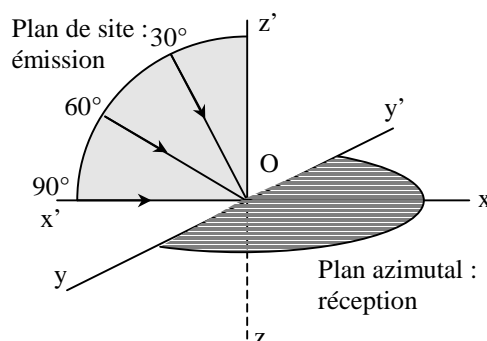
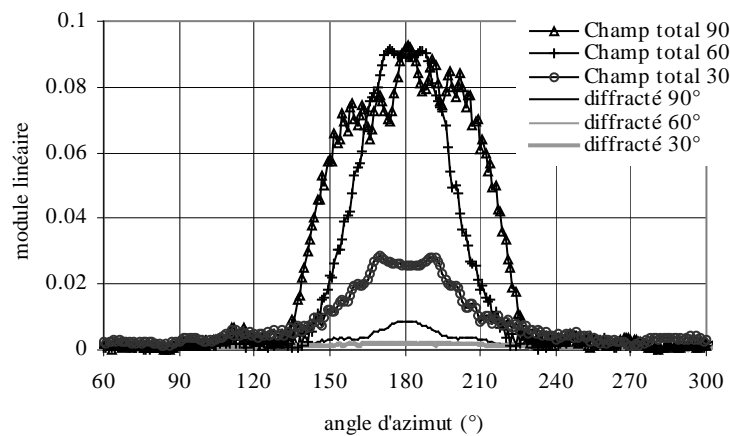


Figure 10a : géométrie multi-statique avec l'émission dans le plan de site et la réception dans le plan azimutal

⁹ Thèse de Christelle Eyraud (2003-2006)

(figures 10b) les valeurs des modules des champs totaux mesurés et les valeurs des champs diffractés obtenus par soustraction vectorielle. Les erreurs résiduelles sont d'autant plus importantes que les niveaux des champs sont faibles.

Figure 10b : Comparaison des niveaux (modules linéaire) entre la mesure du champ total et la valeur du champ diffracté pour les configurations multi-statique avec les angles de sites de 90° , 60° et 30° présentés dans la figure 9b.



Les graphiques supérieurs de la figure 10c, regroupent les courbes des modules en représentation linéaire et des phases des résultats des simulations obtenues en utilisant un développement analytique reposant sur la théorie de Mie [Van, Boh, Tsa, Sto]. Sur les graphiques inférieurs de cette même figure 10c, nous avons regroupé les résultats des mesures effectuées dans les trois cas angulaires de multi-statisme. Nous observons les bruits parasites dans le cas des angles de site 60° et 30° . Ces oscillations résiduelles ne sont pas totalement corrigées car le niveau du bruit de mesure est bien supérieur à celui des mesures en bistatique (site 90°).

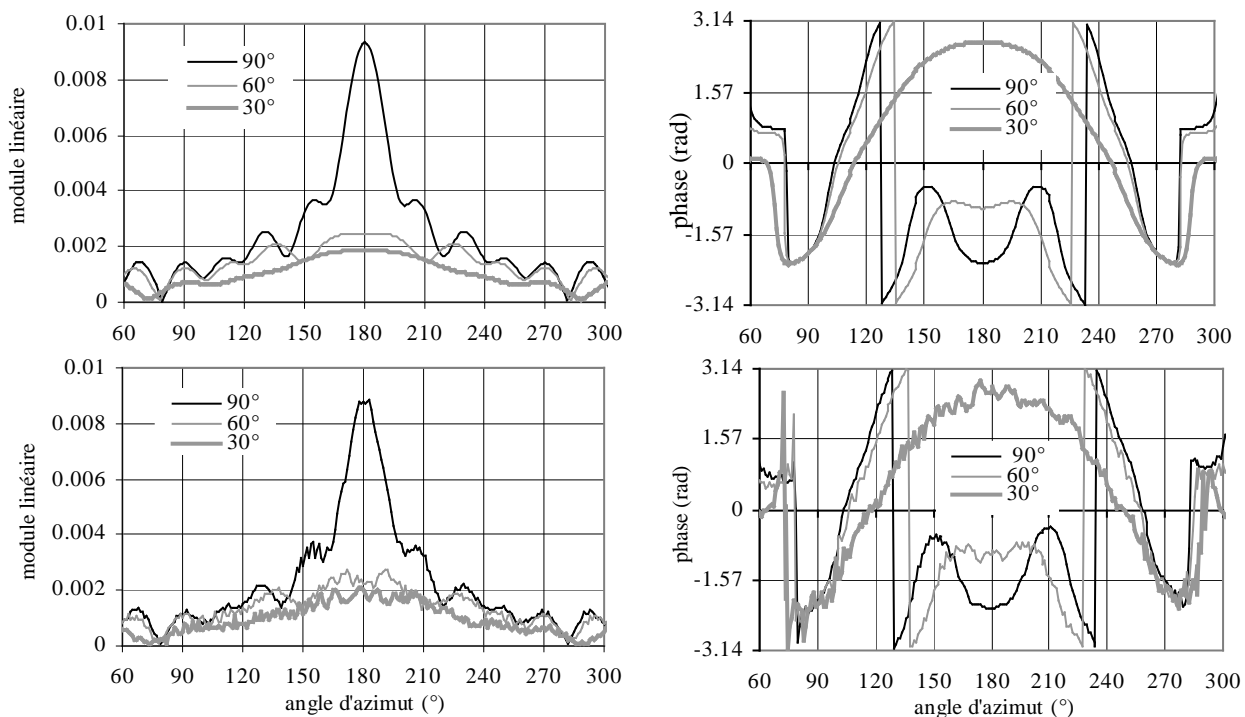


Figure 10c : modules linéaires (graphiques de gauche) et phases (graphiques de droite) pour des configurations multi-statiques avec des angles de sites de 90° , 60° et 30°

Nous rappelons que les résultats présentés sur les graphiques précédents ont été obtenus suivant une configuration géométrique multi-statique avec des angle de site pour la direction d'incidence de 30° , 60° et 90° (cas particulier encore appelé bistatique). Il est bien évident que ces résultats valident, d'une part notre protocole expérimental mis en œuvre dans notre base sphérique ainsi que les toutes les opérations de post traitement que nous mettons en œuvre pour compenser les erreurs liées intrinsèquement à notre système expérimental¹⁰. Fort de ces validations, nous avons alors caractérisé la diffraction par cette cible de référence dans une configuration multi-statique : Les deux antennes (émission et réception) et le centre de la cible ne se trouvent plus dans un même plan horizontal. Nous avons effectué des mesures suivant des angles de site (par rapport à la verticale, origine des angles le zénith) variables. Dans ces conditions, étant donné que les niveaux des signaux reçus diminuent très fortement, les niveaux des erreurs augmentent alors. Pour obtenir des résultats concluant, une extrême rigueur sur le positionnement de la cible est nécessaire.

Application des mesures multi-statique à l'étude d'un modèle macroscopique de particule de suie.

Les diverses présentations de nos résultats nous ont amené à collaborer avec un laboratoire de recherches lyonnais : Le Centre Thermique de Lyon (CETHIL) dans le contexte d'une étude de la caractérisation d'agrégats de sphères diélectriques modélisant des particules de suie. Ce travail commun entre dans le cadre d'un projet national : le projet CAPAS¹¹ [47]. Il s'agit de caractériser le plus finement possible des particules de suie générées par la combustion du kérosène dans les moteurs d'avions pour tenter de comprendre leur formation dans le but ultime de réduire l'émission de ces suies et limiter la pollution de plus en plus importante des zones aéroportuaires. Pour étudier ces particules de suie, des techniques de diagnostics optiques sont mises en œuvre. Cependant, il est impossible de maîtriser précisément les répartitions des sphérules de suie dans les agrégats. Une des solutions pour contourner ces difficultés est d'appliquer un rapport d'échelle aux dimensions des particules de suies pour obtenir des dimensions caractéristiques centimétriques pour les particules. La longueur d'onde utilisée est alors fixée avec ce rapport d'échelle pour se retrouver dans la zone spectrale des ondes centimétriques que nous utilisons classiquement.

¹⁰ Thèse de Christelle Eyraud (2003-2006)

¹¹ CAPAS : **C**Aractérisation des **P**Articules de **S**uie dans les moteurs aéronautiques. Quatrième Appel à propositions "Supersonique" en 2003, Domaine 4 - Combustion et environnement :

Dans cette étude nous avons développé une maquette d'agrégats test. La géométrie globale de cet agrégat est cubique. Il est constitué par un ensemble de 27 sphères diélectriques de diamètre unitaire de 15.90 ± 0.05 mm. Dans ces conditions, la dimension de l'arête du cube est de 47.7 mm. Le matériau de ces sphères est identique à celui de la sphère (diamètre 50mm) étudiée dans le paragraphe précédent (PMMA). Nous avons mesuré les diagrammes angulaires de la diffraction par cette cible. Ces diagrammes de diffraction ont été modélisés à l'aide de deux méthodes numériques différentes, l'une développée à l'institut Fresnel (Méthode basée sur les T-Matrix) et l'autre développée par l'équipe du CETHIL (méthode des dipôles couplés (DDA : Discret Dipole Approximation)). Les résultats sont assez remarquables. En effet, les deux résultats théoriques se superposent avec la courbe expérimentale que ce soit pour le module ou pour la phase. L'ensemble des résultats est regroupé dans le texte de l'article que nous avons soumis ces dernières semaines au *JQSRT* et dont une copie est jointe dans ce manuscrit.



Figure 11 : agrégat 27 sphères comparé à une sphère unitaire et à la sphère diélectrique étudiée précédemment de diamètre 50 mm

Article 2

Amplitude and phase of light scattered by micro-scale aggregates of dielectric spheres: Comparison between theory and microwave analogy experiments

Authors :

Pierre SABOUROUX, Brian STOUT, Jean Michel GEFFRIN, Christelle EYRAUD,
Institut Fresnel

Isil AYRANCI (*,#), Rodolphe VAILLON (*), Nevin SELÇUK (#)

(*) Centre de Thermique de Lyon (CETHIL CNRS-INSA Lyon-UCBL), INSA de Lyon, 69621 Villeurbanne,
France

(#) Chemical Engineering Department, Middle East Technical University, 06531 Ankara, Turkey

Article accepté au *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, Elsevier.

A paraître.

N° : JQSRT-D-06-00015R1

Pour conclure sur cette thématique relative à l'étude de problèmes directs de diffractions suivant de multiples configurations (monostatique, multi-statique), nous avons aujourd'hui acquis une expertise qui nous permet de répondre à un grand nombre de cas d'études et donc cela fait de cette infrastructure, un moyen unique. En effet, Peu de moyens expérimentaux permettent d'effectuer des études de SER en configuration géométrique monostatique, mais aussi des études du pouvoir diffractant par des cibles complexes bidimensionnelles ou tridimensionnelles. Cette versatilité est donc un atout majeur pour aborder de nouvelles thématiques dont celle relative aux problèmes inverses de diffractions.

Application aux problèmes inverses de diffraction.

Avant de présenter des résultats de cette thématique qui est devenue majeure au sein de l'équipe SEMO (Sondages ElectroMagnétiques et Optiques) ces dernières années, quelques rappels historiques ne sont pas superflus. Les premiers balbutiements datent de la période autour des années 1997-1998. En effet, le rapprochement de l'équipe Radioélectricité avec le **Laboratoire de l'Optique Electromagnétique** a permis de regrouper des chercheurs théoriciens spécialistes des problèmes inverses qui venaient d'être recrutés et des expérimentateurs spécialistes des mesures de la diffraction électromagnétique. Cette nouvelle thématique des problèmes inverses de diffraction était extrêmement prometteuse. Les objectifs majeurs étaient la localisation d'objets et la reconnaissance de formes et de constitution des objets cibles par diagnostics électromagnétiques.

Par rapport aux problèmes directs précédemment présentés, les contraintes sont sensiblement différentes : pas angulaire plus large (5° au lieu de 0.5°), pas fréquentiel plus fin. Cependant, la procédure expérimentale n'est pas modifiée en profondeur. Par contre les contraintes sur les cibles étaient plus fortes. En effet, les algorithmes d'inversion de cette époque n'étaient capables de traiter que des cas bidimensionnels, c'est à dire des cibles cylindriques 2D (considérées comme infinies suivant l'axe z) mais avec des sections droites quelconques. Les matériaux constituant les cibles furent dans un premier temps parfaitement conducteurs puis fut diélectriques simples ou multiples avec différents contrastes de permittivités. La difficulté majeure de ces calculs d'inversion réside dans le fait que tous les tests de validations des algorithmes sont effectués sur des données synthétiques (issues de la résolution de problèmes directs numériques). Or, la robustesse de ces algorithmes ne peut être testée qu'à partir d'inversions effectuées sur des données réelles issues de la mesure.

Les premiers algorithmes d'inversion développés au sein de l'équipe utilisaient soit des méthodes intégrales de contours [Bon] soit des méthodes intégrales de domaines [Bel]. Ce sont des méthodes itératives. En outre, une approche multi-fréquence permet d'aborder des cibles de plus grandes dimensions par rapport à la longueur d'onde avec un niveau de résolution optimum. Ces deux méthodes théoriques d'inversion sont reprises dans l'article publié dans le *JEWA*¹².

Avec les premiers résultats d'inversion obtenus à partir de données réelles de champs diffractés par une cible métallique de section droite rectangulaire (26x13 mm² environ), nous avons commencé à proposer nos données expérimentales à la communauté scientifique regroupant les spécialistes de l'inversion. Dans un premier temps, nous avons proposé un nouveau cas d'étude (Cas n°5) à l'atelier SER JINA en 1998. Nous avons fourni, sans préciser la forme de la section droite de la cible, les données expérimentales obtenues avec la cible 2D de section droite rectangulaire. Malgré un grand intérêt des participants, seule deux tentatives d'inversion ont été proposées.

Malgré la pauvreté des soumissions, l'intérêt existait vraiment car nous avons été sollicités à maintes reprises. En effet, nos données, validées par une étude des problèmes directs associés, se trouvaient être les seules disponibles (l'ancienne base de données d'Ipswich [VdB, McG] n'est plus maintenue). Nous avons donc débuté la constitution d'une base de données regroupant les champs diffractés de cibles bidimensionnelles métalliques et plus tard diélectriques. Ce fut le point de départ de nombreuses campagnes de mesures qui ont abouti à la publication dans une revue internationale, de deux bases de données (la première en 2001 et la deuxième en 2005). Ces bases regroupent donc les résultats de mesures de champs diffractés par des cibles bidimensionnelles simplement diélectriques ou métalliques (base de données 2001¹³), complexes ou hybrides métal/diélectrique (base de données de décembre 2005).

Ces deux bases de données ont donc généré la parution de deux numéros spéciaux de la revue *Inverse Problem*. Ces numéros spéciaux regroupent plusieurs articles écrits par des chercheurs internationaux spécialistes des problèmes inverses de diffraction dans lesquels ils

¹² BELKEBIR K., BONNARD S., PEZIN F. SABOUROUX P. and SAILLARD M., Validation of 2D Inverse Scattering Algorithms from Multi-frequency experimental data, *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, Vol. 14, p. 1637-1667, 2000

¹³ Lien internet pour accéder à la base de données *Inverse Problems* :
www.iop.org/EJ/S/0/M22162/ag5JpLkBs6lQ..Ey3ZxKBA/mmedia/0266-5611/17/6/301/

publient les résultats obtenus avec leurs codes numériques d'inversions appliqués à nos données expérimentales relatives aux différentes cibles 2D. L'ensemble de ces données est en libre service sur le site Internet des *IoP*. A l'heure actuelle, des chercheurs travaillent encore et publient toujours à partir de nos résultats publiés en 2001, soit cinq ans après leur parution. Pour fixer les esprits nous avons reporté les deux sommaires des numéros 17 de décembre 2001 et 16 de décembre 2005 pour lister les équipes qui ont inversé nos données expérimentales¹⁴. En outre, la copie de l'article publié dans la session spéciale de décembre 2005 est jointe à ce manuscrit. Cet article regroupe les descriptions des cibles caractérisées, le protocole expérimental ainsi que les résultats du problème direct associé en tant que validation.

INVERSE PROBLEMS

Volume 17, Number 6, December 2001

SPECIAL SECTION: TESTING INVERSION ALGORITHMS AGAINST EXPERIMENTAL DATA

1565 Guest Editors' introduction : Kamal Belkebir and Marc Saillard

1573 Inverse scattering with real data: detecting and imaging homogeneous dielectric objects Lorenzo Crocco and Tommaso Isernia

1585 Shape inversion from TM and TE real data by controlled evolution of level sets C Ramananjaona, M Lambert and D Lesselier

1597 Linear and nonlinear iterative scalar inversion of multi-frequency multi-bistatic experimental electromagnetic scattering data, René Marklein, Kannan Balasubramanian, Anyong Qing and Karl J Langenberg

1611 Inversion of experimental multi-frequency data using the contrast source inversion method, Richard F Bloemenkamp, Aria Abubakar and Peter M van den Berg

1623 Inversion of experimental data using linearized and binary specialized nonlinear inversion schemes, B Duchêne

1635 Multiple-frequency distorted-wave Born approach to 2D inverse profiling, Anton G Tijhuis, Kamal Belkebir, Amélie C S Litman and Bastiaan P de Hon

1645 Imaging from real scattered field data using a linear spectral estimation technique, Markus Testorf and Michael Fiddy

1659 A Bayesian approach for solving inverse scattering from microwave laboratory-controlled data, Alexandre Baussard, Denis Prémel and Olivier Venard

¹⁴ Ces sommaires ainsi que les articles sont accessibles sur les site Internet *Institute of Physics (IoP.org)* dans la rubrique du journal *Inverse Problems*

1671 Modified2 gradient method and modified Born method for solving a two-dimensional inverse scattering problem, Kamal Belkebir and Anton G Tijhuis

1689 An image fusion approach to the numerical inversion of multifrequency electromagnetic scattering data, L Fatone, P Maponi and F Zirilli

INVERSE PROBLEMS

Volume 21, Number 6, December 2005

SPECIAL SECTION ON TESTING INVERSION ALGORITHMS AGAINST EXPERIMENTAL DATA: INHOMOGENEOUS TARGETS

S1 Guest Editors' introduction, Kamal Belkebir and Marc Saillard

S5 Application of the multiplicative regularized contrast source inversion method on TM- and TE-polarized experimental Fresnel data, Aria Abubakar, Peter M van den Berg and Tarek M Habashy

S15 Inversion of multi-frequency experimental data using an adaptive multiscale approach, Alexandre Baussard

S33 Testing the contrast source extended Born inversion method against real data: the TM case, Lorenzo Crocco, Michele D'Urso and Tommaso Isernia

S51 Multi-resolution iterative inversion of real inhomogeneous targets, M Donelli, D Franceschini, A Massa, M Pastorino and A Zanetti

S65 Retrieval of inhomogeneous targets from experimental frequency diversity data, A Dubois, K Belkebir and M Saillard

S81 A two-step iterative inexact-Newton method for electromagnetic imaging of dielectric structures from real data, C Estatico, G Bozza, A Massa, M Pastorino and A Randazzo

S95 Microwave imaging of inhomogeneous objects made of a finite number of dielectric and conductive materials from experimental data, O Féron, B Duchêne and A Mohammad-Djafari

S117 Free space experimental scattering database continuation: experimental set-up and measurement precision, Jean-Michel Geffrin, Pierre Sabouroux and Christelle Eyraud

S131 Reconstruction by level sets of n-ary scattering obstacles, A Litman

S153 Minimum-phase-based inverse scattering algorithm applied to Institut Fresnel data, U Shahid, M Testorf and M A Fiddy

S165 Inversion of multi-frequency experimental data for imaging complex objects by a DTA–CSI method, Chun Yu, Lin-Ping Song and Qing Huo Liu

Article 3

Free space experimental scattering database continuation: experimental set-up and measurement precision,

Auteurs:

Jean Michel GEFFRIN, Pierre SABOUROUX et Christelle EYRAUD,

Article publié dans *Inverse Problems*, Volume 21, Number 6, Decembre 2005

La complexité des cibles grandissant, les mesures deviennent de plus en plus délicates à effectuer. En effet, les limites électroniques des appareils de métrologie (dérive, plancher de bruit, dynamique) et les limites mécaniques (précision des positionnements des antennes d'émission et de réception, alignement des cibles) ont nécessité de développer un sujet de thèse ¹⁵ pour résoudre l'ensemble de ces problèmes et aussi repousser les limites de notre dispositif ¹⁶.

Grâce à notre savoir-faire expérimental associé aux investigations décrites ci-dessus, nous avons abordé le problème bien plus délicat des cibles tridimensionnelles complexes. La particularité et la difficulté de caractériser les champs diffractés par des cibles 3D résident dans le fait que, premièrement comme nous avons pu déjà le voir, les niveaux des champs diffractés sont souvent bien plus faibles que ceux liés aux cibles 2D et, deuxièmement, l'alignement de ces cibles est beaucoup plus délicat à réaliser. Actuellement, les alignements sont effectués à moins d'un millimètre de précision, suivant les trois axes de l'espace (Ox,Oy,Oz) grâce à des procédures d'alignement géométriques complexes. Dans ces conditions, après avoir validé, comme nous l'avons déjà présenté dans les paragraphes précédents, les procédures expérimentales sur des cibles canoniques de type sphères métalliques ou diélectriques pour lesquelles les modélisations des champs diffractés théoriques peuvent être faites par des techniques rigoureuses (méthode de Mie), nous étudions aujourd'hui des cibles complexes comme des cubes diélectriques ou métalliques, des cylindres tronqués diélectriques ¹⁷... Les mesures de champs diffractés sont effectuées dans des configurations géométriques bistatiques ou multistatiques (Annexe C) [29].

A l'issue de ces campagnes de mesures, nous préparons une nouvelle base de données expérimentales regroupant les valeurs de champs diffractés par des cibles tridimensionnelles que nous pouvons observer sur l'image de la figure 12. Les objectifs d'une telle base de données sont de mettre à disposition des chercheurs des données réelles pour valider les résultats de modélisations du problème direct de diffraction utilisant de nouvelles techniques numériques, mais aussi pour tester, toujours sur des données réelles, de nouveaux algorithmes d'inversion 3D.

¹⁵ Christelle EYRAUD : Soutenance de thèse prévue début octobre 2006

¹⁶ un premier article est soumis aux IEEE Trans. on Antenna and Propagation *Manuscript No. AP0606-0506*

¹⁷ un deuxième article est soumis aux IEEE Trans. on Antenna and Propagation *Manuscript No. AP0606-0507*



Figure 12 : Cibles 3D métalliques ou diélectriques, simples ou complexes. Le grand cube présente une arête de 100 mm, les moyens de 80 ou 40mm. Les matériaux diélectriques sont soit du PMMA soit du PA6.

Pour conclure sur ce sujet, nous pouvons préciser à nouveau que la détermination expérimentale de valeurs complexes de champs diffractés fût, durant toutes ces dernières années et encore aujourd'hui, une thématique de recherches appliquée extrêmement dense et vaste qui occupe une grande part de nos activités de recherches. En effet, elle nous permet d'aborder une très grande diversité d'applications. Nous avons souligné la mesure de la SER, mais aussi les problèmes directs et inverses de diffraction ou encore la caractérisation de modèles de suies dans le cadre d'une étude environnementale. A partir de ces résultats, une ouverture possible se trouve aussi dans le domaine de l'astrophysique avec l'étude des poussières interstellaires qui peuvent s'apparenter à des agrégats de particules [47].

Les champs électromagnétiques décrits dans cette première partie, peuvent être considérés comme des champs indirects à savoir issus de la réflexion ou de la diffraction par un objet passif, la cible. Nous pouvons remplacer cet objet par une source de rayonnement direct, à savoir une antenne et procéder aux mêmes mesures de champs à l'aide de la même antenne de réception. Dans ces conditions, nous changeons de thématique de recherches pour découvrir le très vaste domaine de la modélisation théorique et la caractérisation d'antennes avec ses multiples applications.

2- Rayonnement direct : modélisation et caractérisation d'antennes.

Ayant acquis au fil des nombreuses campagnes de mesures une maîtrise de la mesure de champs électromagnétiques, il ne nous a pas été difficile de remplacer une cible passive par une antenne à l'émission. Bien entendu, dans ces conditions nous avons supprimé l'antenne émettrice utilisée dans le cas de la configuration précédente employée pour la mesure de champs diffractés. Nous gardons seulement la deuxième antenne à la réception.

Décrivons maintenant le principe des mesures de caractérisation d'antennes avec les différentes géométries utilisées. Je ne rappellerai pas la théorie précisément des antennes, d'excellents ouvrages s'en chargent infiniment mieux que moi [Bai, Jas, Le] ; je me limiterai à simplement rappeler les grandeurs que nous serons amenés à évaluer. Ces grandeurs sont principalement au nombre de deux : la directivité ou la représentation angulaire du rayonnement et le gain. En fait, nous représenterons la directivité par la variation du champ électrique en fonction des angles d'azimut et de site (Annexe C).

Le gain sera obtenu à partir d'un calcul précis du bilan de puissance entre l'antenne sous test et le récepteur, et ceci dans la direction maximum de rayonnement ou de directivité. Cependant, le calcul du gain ne présentant pas un grand intérêt pour la clarté de ce mémoire, nous le laisserons de côté pour davantage se concentrer sur la directivité.

Suivant sa conception et sa géométrie, une antenne rayonnera un champ électromagnétique suivant une répartition angulaire particulière [Bal]. Suivant cette caractéristique l'antenne sera utilisée pour une application précise. Pour illustrer cette considération, je prendrai les exemples de deux types d'antennes fondamentalement différents : une antenne spatiale embarquée sur un satellite géostationnaire et une antenne destinée à une émission radio UHF terrestre. La première est généralement une antenne à réflecteur parabolique, tandis que la seconde est souvent un dipôle. La première doit émettre sa puissance vers la terre située à 36000 km et concentrée dans un cône présentant une dizaine de degrés d'ouverture alors que la seconde doit rayonner d'une manière le plus isotopique possible, du moins dans un plan horizontal. Ainsi, avec cet exemple, nous pouvons nous rendre compte que cette répartition angulaire de champ rayonné est une caractéristique fondamentale à déterminer pour une antenne donnée. Nous avons donc utilisé les moyens de positionnements géométriques de la chambre anéchoïque pour évaluer expérimentalement ces diagrammes angulaires de directivité.

Après avoir validé nos protocoles de mesures des champs électromagnétiques rayonnés par des antennes tests, notamment des cornets pyramidaux en bande X (8-12 GHz) à des distances de 2 et 10 mètres, nous avons pu étudier différents types d'antennes pour des applications industrielles ou dans le cadre de nouveaux concepts d'antennes à cristaux photoniques.

2.1. Validation du protocole expérimental de la mesure d'antenne : application au test d'une antenne aéroportée.

Pour illustrer les applications industrielles que nous avons eu à effectuer, je vais développer quelques résultats obtenus avec deux antennes prototypes dans le cadre d'une collaboration avec le CETP (Centre d'Etude des Environnements Terrestre et Planétaires à Velizy) [57]. En parallèle avec le programme satellitaire ENVISAT (ENVironmental SATellite (lancement en mars 2002 par un lanceur Ariane V), le CETP avait développé un moyen de test en bande C aéroporté (radar STORM (Système de Télédétection pour l'Observation

par Radar de la Mer) embarqué sous le Merlin IV de Météo-France) pour réaliser des tests de réflectivité pour des cibles identifiées dans l'objectif de valider des mesures effectuées plus tard par le satellite ENVISAT [Hau, Mou]. Ce nouveau moyen était constitué par deux antennes fonctionnant en bande C à une fréquence égale à 5.35 GHz et intégrées dans un radôme circulaire conçu pour être fixé sous l'avion. La première antenne est constituée par un réseau de dipôles plaqués (4x10 dipôles suivant chaque polarisation) et un cornet circulaire à pièges annulaires (ARA MWH535). Ces deux antennes sont bipolarisées. Dans le programme de validation de ce moyen, nous avons la mission de caractériser entièrement les répartitions angulaires de champs des deux antennes dans une configuration classique à 10 m suivant les plans principaux E et H (Annexe D) et suivant les deux géométries de polarisation principales à savoir en co-polarisation (même direction de polarisation pour les antennes d'émission et de



Figure 13 : finalisation de l'étude et tests en chambre anéchoïque de l'antenne en bande C du radar aéroporté STORM. Antenne fixée sous le Merlin IV de Météo France.

réception) et en polarisation croisée (les deux directions sont différentes). Le volume des résultats étant extrêmement important nous reportons sur la figure 14, un exemple de diagramme pour l'antenne cornet circulaire à pièges annulaires. Les deux cas de polarisation (co-polarisation et polarisation croisée) seront superposés pour visualiser les très faibles niveaux de la polarisation croisée par rapport à la polarisation principale.

Ce fût une collaboration extrêmement riche car lors des campagnes de mesures, les deux équipes (celle du CETP et la nôtre) étaient réunies à Marseille pour effectuer ces mesures dans les meilleures conditions. A l'issue de cette collaboration un rapport détaillé fut rédigé [57] qui a servi de référence dans la suite du programme STORM.

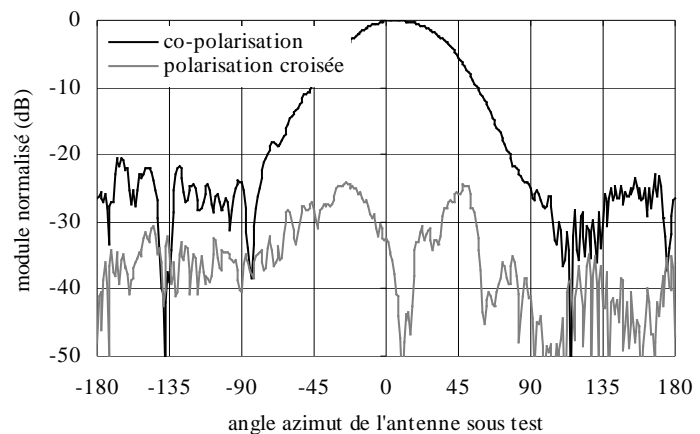


Figure 14 : Diagramme de directivité en co-polarisation et polarisation croisée. Fréquence 5.40 GHz, Plan H.

Par la suite, nous avons eu d'autres collaborations industrielles pour tester des prototypes d'antennes comme avec *Antenna Research Associated* dans le cadre de tests de nouveaux concepts de réflecteurs paraboliques. Nous ne développerons pas les résultats obtenus dans ce mémoire, car il n'apporterait rien de plus.

2.2. Modélisation et caractérisation d'antennes utilisant des métamatériaux

Les métamatériaux [Ves, Pen, May], structures composites artificielles peuvent présenter des propriétés électromagnétiques qui ne se retrouvent pas dans les matériaux naturels. Il s'agit en général de structures périodiques, diélectriques ou métalliques. Ces structures se comportent comme des matériaux homogènes qui n'existent pas à l'état naturel. Les validations expérimentales ne sont donc pas évidentes [She1]. Dans le cadre d'études amonts, nous avons modélisé, conçu, testé et validé de nouveaux concepts d'antennes directives planes utilisant le concept physique des métamatériaux.

Avant d'appliquer le concept des métamatériaux à un nouveau concept d'antenne, nous avons mis en évidence les propriétés d'un cristal photonique diélectrique bidimensionnel

(figure 15). Les phénomènes physiques ont été prédits numériquement et modélisés [Eno, Tay]. Les principaux phénomènes sont bien entendus les bandes interdites de ces modèles de cristaux photoniques [Fel], les phénomènes anormaux de réfraction [Gral] ont été observés sur un modèle de cristal photonique diélectrique bidimensionnel à maille hexagonale. Nous avons procédé à la conception d'une maquette pour valider expérimentalement les résultats prédits numériquement.

Pour cela nous avons choisi un matériau diélectrique (permittivité relative de l'ordre de 6, vérifiée à l'aide de notre outil *EpsiMu*). Quatre vingt dix tiges de diamètre 10 mm et de longueur d'environ 300 mm ont été disposées parallèlement entre elles suivant une géométrie hexagonale. Le paramètre principalement mesuré est la transmission d'une onde électromagnétique en basse fréquence : entre 2 GHz et 6 GHz. Les résultats ont été regroupés et publiés dans un article dont une copie est jointe.



Figure 15 : maquette de modèle de cristal photonique diélectrique bidimensionnel à base hexagonale.

Article 4

Experimental and theoretical study of resonant microcavities in two-dimensional photonic crystals

Auteurs :

Pierre SABOUROUX, Gérard. TAYEB et Daniel. MAYSTRE

Article publié dans *Optics Communications*. 160, p.33-36, 1999

Les connaissances acquises sur les phénomènes physiques des métamatériaux, nous ont permis d'envisager un nouveau concept d'antennes planes directives [Eno1, Eno2, Tay]. La modélisation du rayonnement de certaines structures, nous a orienté vers une structure périodique métallique tridimensionnelle basée sur un ensemble de grilles métalliques. Nous avons conçu un prototype d'antenne avec lequel, nous avons effectué une validation expérimentale des phénomènes physiques prédits théoriquement.

La maquette originale que l'on peut observer sur la figure 16, est constituée d'un empilement de 6 grilles métalliques (cuivre) espacées à l'aide de mousse à très faible permittivité (Rohacell HF). Les côtés sont recouverts d'un revêtement conducteur pour conserver la continuité électrique. L'élément rayonnant est un monopôle

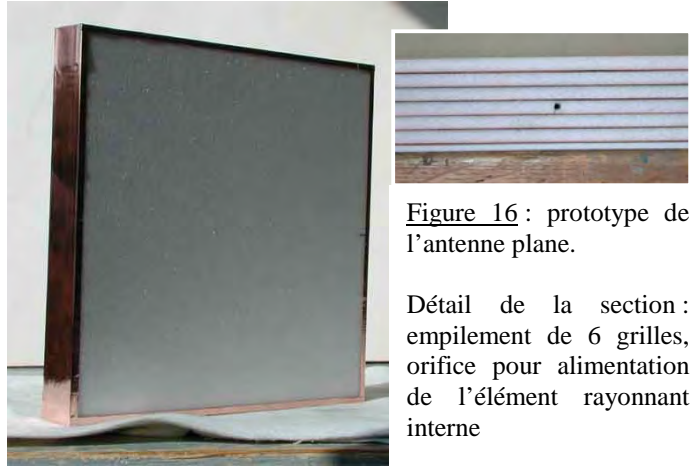


Figure 16 : prototype de l'antenne plane.

Détail de la section : empilement de 6 grilles, orifice pour alimentation de l'élément rayonnant interne

placé au centre du dispositif et alimenté à l'aide d'un câble coaxial. La fréquence de fonctionnement optimum est 14.65 GHz. Les dimensions du plan rayonnant sont environ 225x225 mm². L'intérêt majeur d'un tel dispositif rayonnant est de posséder un diagramme de directivité présentant un angle d'ouverture à demi-puissance réduit. Expérimentalement, nous vérifions que l'ouverture du diagramme est inférieure à 13° pour les plans E ou H.

L'originalité de ce concept, pour lequel les résultats ont été publiés dans *Physical Review letter* en 2002 [5] (une copie de cet article est reportée en fin de paragraphe) a été soulignée à maintes reprises avec notamment la parution de plusieurs articles dans des revues de vulgarisation scientifique nationales ou internationales. Nous reportons une liste de ces articles qui sont parus entre 2002 et 2004 ¹⁸.

Light Given New Direction, *Physical Review Focus*, 12 nov. 2002.

Metamaterial bends microwaves into beam, *Nature Science Update*, 23 nov. 2002.

Matériau composite pour antenne plane, *La Recherche*, Numéro 360, p. 10, janv. 2003.

Une antenne parabolique directionnelle...plane, *Industrie et Technologies*, Numéro 845, p. 22, fév. 2003.

Des physiciens ont conçu l'antenne radio du futur, *Science & Vie*, Numéro 1026, p. 24, mars 2003.

La lumière à l'envers, *Science & Avenir*, Numéro 683, p. 70-71, janv. 2004

¹⁸ certains de ces articles sont inclus dans ce mémoire juste après l'Article 5.

A la suite de ces résultats, dans le cadre d'une collaboration de recherches avec Alcatel, nous avons développé d'autres prototypes d'antennes plates directives. Ces nouveaux prototypes étaient bien entendus liés aux résultats des modélisations obtenus. Les structures présentaient des dimensions plus réduites (environ 60x60 mm²) et ne comportaient qu'une ou deux grilles. Ces ensembles étaient alimentés par des ouvertures rayonnantes (des guides rectangulaires ouverts par exemple). Sur la figure 17, nous pouvons observer deux des prototypes simulés et caractérisés dans ces études. Sur les photographies nous pouvons voir des systèmes de fixations des guide rectangulaire d'alimentation. Ces pièces servent d'interface mécanique solidarissant l'ensemble de l'antenne sous test au système mécanique de positionnement

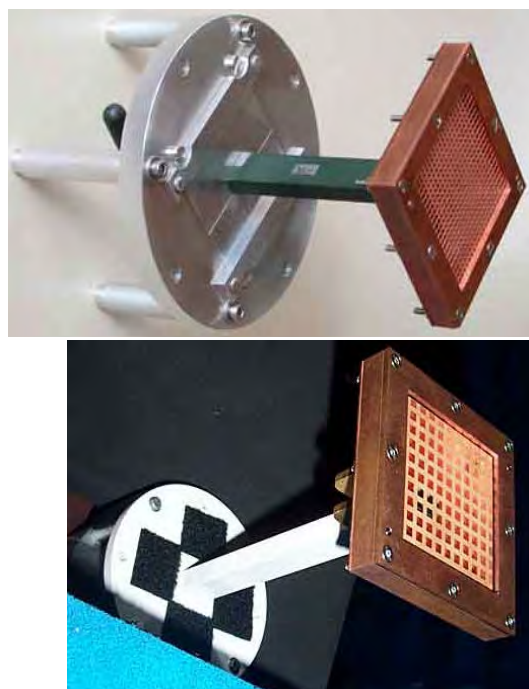


Figure 17 : autres prototypes d'antennes à grilles métalliques alimentées par des ouvertures rayonnantes

Les résultats obtenus sur ces prototypes ont fait l'objet de publications [10] ou de communications [18, 40, 41]. Nous reportons sur les graphiques de la figure 18, les résultats théoriques et expérimentaux obtenus dans le plan H à partir d'un des prototypes visible sur la figure 17. Le maximum de directivité est obtenu à la fréquence correspondant à une longueur d'onde égale à 20.26 mm soit environ 15 GHz.

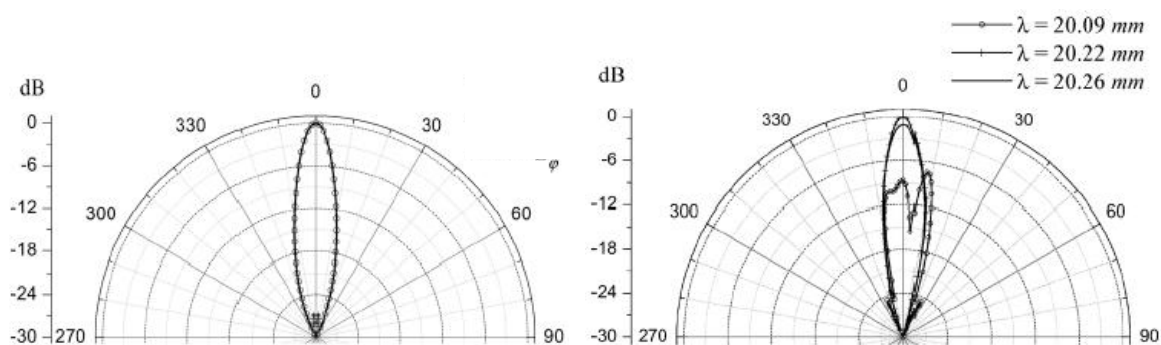


Figure 18 : Simulation (graphique de gauche), expérimentation (graphique de droite). Plan H. Système rayonnant alimenté à l'aide d'un guide en bande Ku.

Article 5

A Metamaterial for Directive Emission

Auteurs :

S. ENOCH, G.. TAYEB, P. SABOUROUX, N. GUERIN and P. VINCENT

Article publié dans *Phys. Rev. Letter, Vol 89, Num 21, 213902, nov 2002*

Articles de presse relatifs à la parution de l' Article 5 :

- 1- **Physical Review Focus** – november 2002
 - 2- **Nature Science Update** – november 2002
 - 3- **La Recherche** - janvier 2003
 - 4- **Industrie et Technologies** - fevrier 2003
 - 5- **Science et Vie** - mars 2003
-

2.3. Introduction aux systèmes antennaires multicauteurs

Une collaboration avec France Telecom R&D a débuté ces derniers mois dans le cadre de l'étude des performances des nouveaux systèmes antennaires MIMO (**M**ultiple **I**nput – **M**ultiple **O**utput). Ces nouvelles techniques utilisant plusieurs antennes à l'émission et plusieurs antennes à la réception associées à la notion de diversité principalement d'espace ou encore de diagramme, sont en plein essor dans le cadre des troisième et quatrième générations de téléphonie mobile. L'objectif est d'accroître le débit de transmission pour des applications multimédia. L'étude est développée suivant deux directions. La première est la modélisation de la capacité du canal de transmission en milieu urbain en utilisant des outils de prédiction internes à France Telecom et la seconde est l'optimisation du choix et de l'implantation des antennes miniatures sur le téléphone mobile. Après avoir effectué son stage de MASTER 2-Recherche en association avec France Telecom et l'Institut Fresnel, une étudiante ¹⁹ prépare actuellement une thèse sur cette thématique [26].

Pour conclure sur la thématique *Mesures d'antennes*, j'indiquerai qu'il me semblait logique qu'un jour ou l'autre nous soyons amenés à tester des antennes. En effet, la conception même du banc expérimental avait été prévue pour effectuer de telles études moyennant des modifications du banc de mesures mineures. Par contre, cette double compétence expérimentale associant la mesure de champs diffractés par des cibles et le test d'antennes est peu courante. C'est ainsi qu'aujourd'hui notre équipe est reconnue pour ses résultats de références par plusieurs communautés scientifiques comme les antennistes, les radaristes ou encore les spécialistes de problèmes directs et inverses de diffraction en électromagnétisme.

Au fil des différents programmes de mesures, nous avons été amenés à concevoir des maquettes d'études, des prototypes. Toutes ses réalisations pratiques utilisent divers matériels (connecteurs, câbles) et matériaux (diélectriques, métalliques). Pour les diélectriques un problème se pose à chaque étude : il nous faut connaître avec précision les caractéristiques diélectriques de ces matériaux à savoir la permittivité diélectrique et la perméabilité magnétique. Suite à un besoin expérimental associé à mes connaissances sur le sujet, j'ai mis en place une troisième thématique de recherche : la mesure de caractéristiques électromagnétiques des matériaux.

¹⁹ Sophie VERGERIO. Thèse financée par France Télécom ; Soutenance prévue : juillet 2007.

3- Détermination des caractéristiques électromagnétiques de matériaux

Pour avoir travaillé, entre autre, sur ce sujet durant mes années de thèse, j'étais déjà sensible à ce sujet. Quand le besoin est apparu au laboratoire, j'ai conçu et installé un nouveau banc de mesures de permittivité et de perméabilité complexes de matériaux utilisant la méthode classique de réflexion/transmission avec une cellule coaxiale [7]. D'ailleurs, grâce à ce nouveau moyen, j'ai eu à gérer plusieurs collaborations industrielles [58] dont certaines étaient classifiées.

Dans les mois qui suivirent, j'ai été à plusieurs reprises sollicité pour effectuer des mesures sur des matériaux divers. La répétition de ces sollicitations m'a fait réfléchir sur cette problématique et j'en suis arrivé au constat qu'il existait un réel besoin chez un grand nombre d'industriels ou de laboratoires de recherches. Il leur fallait connaître simplement et rapidement les caractéristiques électromagnétiques intrinsèques des matériaux qu'ils utilisaient dans le domaine des hyperfréquences. Après avoir fait une recherche sur les différents outils disponibles, je me suis rendu compte que très peu de solutions existaient. Ces solutions étaient au nombre de trois : la première solution chez Agilent Technologies (ex Hewlett Packard) utilisait une cellule à effet de bout associée à un logiciel, la deuxième toujours chez Agilent Technologies était constituée par un logiciel dédié à la mesure de ces caractéristiques. Et enfin la troisième solution était de s'adresser à un laboratoire de recherches sachant faire ce type de mesures. Bien entendu cette dernière solution présente des inconvénients comme les délais, les aléas liés intrinsèquement à toute procédure expérimentale de laboratoire de recherches tandis que les deux premières sont complexes à mettre en œuvre pour des néophytes dans ce domaine.

Fort de ce constat, j'ai décidé de faire évoluer la technique de mesure que j'utilisais régulièrement dans l'objectif de la simplifier au maximum, de la fiabiliser et finalement d'effectuer un transfert technologique vers les différentes entreprises industrielles ou laboratoires de recherches. Ce fût un de mes projets majeurs de ces trois dernières années.

Des étudiants ^{20 21} m'ont épaulé dans cette entreprise. Ce projet a été soutenu par l'ANVAR dans le cadre d'une Aide aux Jeunes [60]. Enfin, dans le cadre de la protection industrielle une Enveloppe SOLEAU a été déposée en 2004 auprès de l'Institut National de la Protection Industrielle (INPI).

²⁰ Pascal CONTE, mémoire CNAM, 9 juillet 2003

²¹ Pascal BOSCHI, mémoire CNAM, 24 mars 2005

Aujourd'hui le projet est finalisé dans sa première phase. En effet, un premier prototype de kit de mesure *EpsiMu* existe. Il est constitué d'une cellule coaxiale associée à un logiciel dédié. Ce nouvel outil de mesure permet d'effectuer extrêmement simplement des mesures de toutes les caractéristiques (ϵ' , ϵ'' , μ' , μ'') simultanément en temps réel. Je rappelle que les anciennes techniques de mesure étaient longues et fastidieuses à mettre en œuvre.

Ce nouveau kit de mesure a été présenté à un Congrès Européen (ETTC 2005) et a fait l'objet de publications [13, 14, 43]. Déjà, des contacts universitaires et industriels ont été pris. Des collaborations vont donc voir le jour ces prochains mois. Dans ce contexte, une première collaboration avec l'Institut Franco Allemand de Saint Louis (ISL) s'est mise en place ces dernières semaines pour tester en configuration industrielle le kit *EpsiMu*. Les premiers tests auront lieu à la fin du mois de juin. J'encadrerai à cette occasion une étudiante lors d'un stage de deuxième année de Polytech Marseille (DMT) avec qui nous validerons en milieu industriel le concept *EpsiMu*.

Pour décrire le formalisme utilisé et les résultats obtenus, la copie d'un article paru dans la Revue des Electriciens et des Electroniciens est jointe à ce mémoire (n°8 septembre 2005 [7]). A la demande du comité de direction de cette revue un deuxième article plus axé sur l'outil *EpsiMu* lui-même a été rédigé et est paru au mois de novembre suivant [8].

Enfin, nous avons établi une collaboration avec une équipe de l'INSA-IETR de Rennes²² sur l'étude de milieu stratifié. A l'aide de notre moyen de mesures en configuration de propagation guidée, nous avons pu comparer nos résultats avec ceux obtenus avec technique en espace libre [19].

²² Cette collaboration nous a permis de travailler avec Florence SAGNARD du groupe *Communications Propagation Radar* de l'IETR de Rennes. Ce travail a été concrétisé avec une conférences au 17^{ème} Colloque International Optique Hertzienne et Diélectrique (OHD) en 2003.

Article 6

Simplification de la procédure de mesure de caractéristiques électromagnétiques de matériaux en temps réel.

Auteurs :

P. Sabouroux et P.Boschi

Article publié dans la *Revue de l'Electricité et de l'Electronique (REE)* – No.8, sept ; 2005

Pour conclure cette partie majeure relative aux résultats obtenus lors de ces longues années de recherches, je rappellerai que l'ensemble du banc expérimental de la base de mesures sphérique a été conçu pour permettre la mise en œuvre d'un grand nombre de configurations géométriques pour répondre aux exigences expérimentales rencontrées dans les différents programmes de mesures liés aux thématiques de recherches de l'équipe. Aujourd'hui, cette configuration sphérique est largement utilisée en présentant des niveaux de résultats extrêmement élevés ce qui nous permet de nous positionner comme des experts en métrologie hyperfréquence. Cette compétence nous permet d'aborder avec pertinence tous nouveaux sujets de recherches avec des projets de nouveaux bancs expérimentaux et ainsi de démarrer de nouvelles études. Ces thématiques, toujours centrées sur la problématique de la mesure de champs diffractés vont nous permettre d'explorer de nouveaux domaines comme la détection d'objets enfouis et d'une manière indirecte le domaine de l'agriculture de précision (nouvelle collaboration avec l'INRA d'Avignon). Nous allons développer ces nouveaux domaines dans la seconde partie de ce volet consacré à la recherche.

4- Perspectives, ouvertures vers des thématiques émergentes

Les compétences théoriques et expérimentales acquises dans l'équipe SEMO de l'institut Fresnel sont complémentaires. En effet, les résultats théoriques obtenus à l'aide de codes de calculs permettant de modéliser le rayonnement électromagnétique direct (rayonnements d'antennes) et indirect (diffractions électromagnétiques par des objets complexes) sont validés à l'aide des outils expérimentaux mis en place ces dernières années. Fort de cette complémentarité, nous allons aborder des thématiques de recherches novatrices au sein du laboratoire. Ces thématiques émergent du contexte scientifique actuel avec ses nécessités, ses verrous, ses interrogations ...

Le contexte scientifique de l'électromagnétisme est extrêmement vaste. Nous ciblons des sujets pour lesquels nous pourrions apporter des éléments de réponses à savoir, le domaine des télécommunications dans la partie relative aux nouveaux concepts d'antennes simples ou multiples, et la partie du rayonnement par des objets ou milieux complexes et inhomogènes.

Il est vrai que le problème de l'antenne dans tout système de télécommunication est un problème en lui-même. En effet, l'évolution des antennes avec les nouveaux concepts doit répondre à certains critères normatifs, géométriques, environnementaux... Aujourd'hui, avec la multiplication des transmissions de données classiques (téléphonie) et multimédia (visiophonie, internet, ...), un dispositif de communication radio doit être capable de fonctionner simultanément sur plusieurs bandes de fréquences. L'exemple le plus manifeste de nos jours est le concept des antennes UWB (Ultra Wide Band) ou ULB (Ultra Large Bande). Au sein de l'institut Fresnel, nos compétences dans la modélisation et la caractérisation expérimentale de prototypes d'antennes nous permettent de répondre aux interrogations des concepteurs de ce type d'antennes. En effet, nous avons ou aurons à court terme, les moyens de tester ces prototypes dans des environnements parfaitement contrôlés. Dans ce contexte scientifique, la communauté scientifique marseillaise possède la totalité des compétences pour constituer un pôle de recherche global dans ce domaine des antennes UWB. La fédération des potentiels humains de recherches locaux pourrait générer un centre de compétence national voire international d'un niveau extrêmement élevé. Outre les contraintes normatives avec la multiplication des bandes de fréquences utilisées, des contraintes géométriques sont aussi présentes. En effet, pour augmenter les débits dans les télécommunications, de nouvelles stratégies de transmission sont envisagées comme l'utilisation de systèmes multicauteurs, le plus connu étant les systèmes MIMO. Le problème majeur rencontré aujourd'hui est l'implantation de plusieurs éléments rayonnants ou antennes dans un volume de plus en plus réduit (téléphone portable ($44 \times 100 \text{ mm}^2$), oreillette, ...). La modélisation à l'aide de codes "maisons" ou commerciaux nous permettent d'orienter les solutions envisageables. Il nous restera à mettre en place une solution expérimentale avec une ou plusieurs maquettes de principe pour valider les nouveaux concepts d'implantations. Enfin, la notion d'antenne est de plus en plus liée à des contraintes environnementales. En effet, les contraintes d'esthétisme engendrent des contraintes sur la géométrie même des éléments rayonnants et donc sur les concepts intrinsèques des éléments. L'exemple que tout le monde peut observer dans nos environnements urbains et la multiplication d'antennes de réception satellite paraboliques avec leur impact visuel négatif. Pour cela de nouveaux concepts ont été proposés comme les antennes plates directives qui pourraient être fixées voir camouflées directement sur un mur.

Outre l'aspect utilisateur de l'antenne, un aspect outil est aussi à soulever. En effet, la notion d'antennes reconfigurables ou encore antennes actives, est au cœur même des derniers systèmes de détection radar monostatiques ou multi-statiques. Cependant, la caractérisation

précise de ces nouveaux aériens nécessitent des environnements parfaitement contrôlés. Ainsi nous allons utiliser notre expertise et savoir-faire expérimental au service de la caractérisation de ces nouveaux systèmes rayonnants en vue de valider de nouvelles solutions.

Comme il a été précédemment présenté, le domaine des antennes avec les challenges associés, est très vaste. Nous les étudions, les caractérisons, mais en plus nous les utilisons comme des capteurs de champs rayonnés indirects c'est à dire dans le domaine de l'étude des champs diffractés. Ce type d'étude utilise les bancs actuels mais aussi les nouveaux qui seront mis en place dans les prochains mois, voir les prochaines années. Il s'agit de répondre à des questions scientifiques majeures. La détection d'objets diélectriques complexes est un challenge que l'on a commencé avec les objectifs de détecter dans le proche sous-sol des objets de petites tailles comme des mines antipersonnel mais aussi des objets de plus grandes tailles comme des canalisations. L'étude de composants diffus comme une zone à teneur en humidité variable constitue un projet à court terme. En effet, en collaboration avec plusieurs laboratoires régionaux ou nationaux nous allons tenter de répondre à des questions relatives à l'écoulement de l'eau dans différents types de sol dans un objectif lointain de fournir des grandeurs quantitatives en vue de la régulation de l'arrosage pour gérer la quantité d'eau utilisée et ainsi limiter les gaspillages lors des arrosages. Ces notions entrent dans le cadre de la mise en place d'une agriculture de précision soucieuse de la régulation des ressources naturelles. Parmi les objets complexes et plutôt diffus, le problème de la détection d'une cible biologique dans le proche sous-sol sera une suite logique de nos recherches actuelles. Ce problème intéresse notre région car les solutions trouvées dans ce problème scientifique pourraient être appliquées au problème de la détection des truffes. En effet, les caractéristiques physiques et la localisation de ces champignons dans le proche sous-sol en font une cible de choix pour nos développements théoriques électromagnétiques 3D et nos futurs bancs expérimentaux. Cette étude n'est pas scientifiquement majeure pour la communauté de chercheurs travaillant sur la thématique relative à la détection des objets enfouis, mais peut avoir des répercussions importantes sur l'économie rurale de la région. En outre, cela permet d'avoir une ouverture d'esprit vers d'autres personnes et ainsi associer deux milieux profondément différents. Au final, un système autonome de détection pourrait être développé. La première étape pour cette étude de la détection de truffes est la connaissance de la permittivité diélectrique de ce type de matériau pour évaluer le contraste diélectrique entre le champignon et la nature du sous-sol. La détermination de la permittivité de différents matériaux est, comme je l'ai présentée dans la première partie de ce mémoire, une partie importante de mes dernières activités de recherches. Cette technique est

particulièrement bien adaptée notamment à ce type de matériaux. Mais la lourdeur technique des appareils ne permet pas aujourd'hui d'effectuer des mesures sur le terrain. Dans ce contexte, une vision à moyen terme de cette thématique est de transformer la technique *EpsiMu* en la conception d'un *Epsilon-mètre* autonome. Ce projet d'appareil autonome n'est possible qu'avec la collaboration étroite avec les bureaux d'études des fournisseurs d'analyseurs de réseau. En effet, le cœur d'un tel appareil sera constitué par une architecture simplifiée d'une chaîne de mesures vectorielle. Des contraintes de systèmes électroniques hyperfréquence, d'ergonomie (IHM) et bien entendu des contraintes purement physiques sont présentes.

La présentation précédente des thématiques émergentes de notre équipe présente de nombreuses facettes tant physiques que biologiques et enfin, et bien entendu industrielles car au final des applications industrielles sont incontournables. Ce sont de nombreux projets à courts ou à moyens termes, voir à longs termes, qui nécessitent outre la gestion de problèmes scientifiques, celle de solutions de financements et bien entendu la gestion de problèmes humains avec les coordinations des diverses collaborations inter laboratoires et l'encadrement des étudiants participants aux projets.

Pour répondre à ces problématiques naissantes, nous devons faire évoluer nos moyens expérimentaux et humains. En effet, actuellement, la base de mesure constituée par la chambre anéchoïque associée aux positionneurs de la base sphérique ainsi qu'à la chaîne de mesures hyperfréquences est mise à notre disposition seulement une semaine par mois. Cette disponibilité est aujourd'hui largement insuffisante pour avoir une croissance scientifique satisfaisante. En outre, dans l'optique de développer ces nouvelles thématiques émergentes, nous avons débuté en 2004, le projet d'un nouveau banc expérimental utilisant la géométrie plane et qui sera installé finalement avant l'été 2006 dans les nouveaux locaux de l'Institut Fresnel. Ce projet est largement soutenu financièrement par les collectivités locales (Conseil Régional Provence Alpes Côte d'Azur, le Conseil Régional des Bouches du Rhône, la Ville de Marseille) et par nos tutelles scientifiques (les Universités de Provence et Paul Cézanne, le CNRS) et scientifiquement pas de nombreux laboratoires régionaux, nationaux et internationaux.

En quelques mots, ce nouveau banc de mesures sera constitué d'un double positionneur plan d'antennes avec pour objectif de sonder électromagnétiquement une zone présentant une surface d'environ 2.50m x 2.50m. La chaîne de mesures est basée sur l'utilisation d'un tout nouvel analyseur de réseau vectoriel fonctionnant en très haute fréquence jusqu'à 40GHz soit

quasiment deux fois plus élevée que les appareils constituant la chaîne de mesures de la base sphérique. Bien entendu, pour contrôler parfaitement la zone de mesures (limiter les réflexions parasites sur les limites de la zone) les parois verticales et horizontales seront recouvertes de matériaux absorbants.

Les applications majeures envisagées aujourd'hui pour ce nouveau dispositif sont multiples. Il est bien évident que la liste qui va suivre n'est pas exhaustive car ce dispositif est conçu pour être le plus polyvalent possible pour répondre aux problématiques à venir dans les prochaines années. Ainsi de nouvelles thématiques peuvent émerger *a posteriori*. L'application première, comme je l'ai déjà indiquée précédemment, sera la détection d'objets enfouis tels que des canalisations ou des objets diélectriques de petites dimensions comme des mines antipersonnel ou des corps biologiques par exemple, ou encore des défauts sous une surface donnée. Dans le cadre de cette thématique, nous avons débuté une collaboration avec l'INRA d'Avignon pour étudier grâce à des techniques micro-ondes, l'infiltration de l'eau dans le sol et l'absorption racinaire par des plantes dans un objectif final de proposer des solutions pour réguler la quantité d'eau lors des arrosages et ainsi optimiser les consommations de l'eau.

La cartographie de champs rayonnés en champ proche sera aussi une application importante. Il nous sera alors possible d'étudier de nouveaux concepts d'antennes fonctionnant depuis environ 800MHz jusque dans la bande Ka (40GHz). Cette bande de fréquences est une bande de plus en plus utilisée dans le domaine notamment des télécommunications satellitaires. En outre, cette largeur de bande importante permettra de tester des systèmes de télécommunication très larges bandes comme par exemple les systèmes antennaires UWB.

Enfin dans le cadre de la détermination de permittivité diélectrique, ce système sera particulièrement bien adapté pour des mesures en espace libre.

Ce nouveau banc expérimental, prévu en tests de validation pour l'été 2006, sera disponible pour notre équipe 100% du temps. Nous allons pouvoir, d'une part, monter en puissance au plan humain notamment avec un potentiel d'accueil accru avec des étudiants en formation par la recherche (MASTER 2 Recherche et Doctorat) ou en formation technique (ingénieur), et d'autre part accroître le nombre de campagnes de mesures relatives à de nombreux sujets étudiés dans les différentes thématiques émergentes.

5- Encadrement de la recherche, production scientifique et contractuelle

Tous mes travaux de recherches n'ont pu aboutir qu'avec le concours d'étudiants qui ont préparé, ou qui préparent un diplôme (MASTER 2, Doctorat, stage de fin d'études, ...). L'encadrement de ces étudiants dans un cadre de formation par la recherche amont ou pratique nous amène à aborder des problématiques suivant plusieurs directions, ce qui nous oblige, nous enseignants chercheurs à nous remettre en cause et par ce biais, d'évoluer. Dans ces conditions, l'encadrement d'étudiants est incontournable pour effectuer un travail de recherche efficace et diversifié.

Je présente une liste des étudiants que j'ai encadrés tout au long de ces années. Certains, ont terminé leur formation et occupent un poste, d'autre sont en cours de formation.

5.1- Encadrement de stages :

Stage longue durée ²³

2006 : **Antonella PROSERPIO**, *Validation de la nouvelle chaîne de mesures vectorielle hyperfréquence du scanner plan*, stage de fin d'étude de mars 2006 à fin novembre 2006 en dernière année de *Politecnico di Milano* dans le cursus *Ingenieria delle Telecomunicazion*.

Mémoires de fin d'étude Ingénieur CNAM

2000-2001 : **Jean Luc PERE** : *Etude de faisabilité d'une transmission optique en espace libre d'un signal hyperfréquence analogique – Application à une alimentation d'une antenne sans fil*.

Aujourd'hui Jean Luc Péré est rentré en Corse pour poursuivre sa vie professionnelle. Je n'ai pas d'informations complémentaires sur sa situation professionnelle.

²³ Je ne mentionne que ce stage car il présente une durée et une somme de travaux importante. Par contre, je ne mentionne pas tous les stages de durée plus réduite (entre 1 et 2 mois) relatifs aux stages de deuxième année d'écoles d'ingénieurs ou d'IUT. Je me suis occupé environ d'une douzaine de stagiaires effectuant ce type de stages.

2002-2003 : **Pascal CONTE** : *Caractérisation temps réel de permittivité et perméabilités de matériaux en hyperfréquence sur une large bande.*

Soutenu le 9 juillet 2003.

Aujourd'hui Pascal Conte est en poste dans un département technique de la SNCF sur le site Marseillais.

2004-2005 : **Pascal BOSCHI** : *Finalisation d'un kit de mesures de caractéristiques électromagnétiques de matériaux dans le domaine des hyperfréquences.*

Soutenu le 24 mars 2005

Aujourd'hui Pascal Boschi est en poste chez Blachere Illumination, Apt.

Stages de DEA ou de MASTER 2 Recherche :

1996 : **Olivier VEYRUNES** : *Calibrage et Exploitation d'une base de mesure de S.E.R.*

Après la préparation d'un Doctorat chez FranceTélécom sur l'étude de l'influence des hydrométéores sur les liaisons hertziennes, Olivier est en poste chez FranceTélécom R&D à Belfort.

2003 : **Christelle EYRAUD** : *Validation de la base de mesure sphérique de diffraction 3D dans le domaine des hyperfréquences.*

2004 : **Sophie VERGERIO** : *Recherche des caractéristiques optimales d'antennes multi-capteurs pour les systèmes MIMO*

5.2 Thèses de Doctorat :

N'étant pas encore habilité à diriger les recherches, je co-encadre deux thèses dont la première doit être soutenue avant la fin de l'année 2006 et la seconde en 2007.

2003-2006 : **Christelle EYRAUD**, *Etude et amélioration de la mesure de la phase des champs diffractés*, Bourse MENRT, Co-encadrée avec Hugues GIOVANNINI, Professeur à l'Université Paul Cézanne.

2004-2007 : **Sophie VERGERIO**, *Recherche des caractéristiques optimales d'antennes multi-capteurs pour les systèmes MIMO*, Bourse France Télécom, Co-encadrée avec Jean Pierre ROSSI, HDR, Ingénieur France Telecom R&D.

5.3 Production scientifique et contractuelle

Thèse d'Université, N° d'ordre 736, Bordeaux I, **1992** Soutenue le 17 juin 1992

Auteur : Pierre SABOUROUX

Titre : "Modélisation et caractérisation de matériaux absorbants dans le domaine des hyperfréquences."

Les références en dont le numéro est en caractère gras [x], se trouvent dans le mémoire.

Publications dans des Revues Internationales avec Comités de Lectures

- [1] "Techniques de mesures en vue de la caractérisation de structures absorbantes larges bandes."
P. Sabouroux et J.P. Parneix
Journal of Wave-Material Interaction, Vol. 7, N° 1, Janvier **1992**
- [2] "Experimental and theoretical study of resonant microcavities in two-dimensional photonic crystals"
P. Sabouroux, G. Tayeb, D. Maystre.
Optics Comm. **160**, p.33-36, **1999**
- [3] "Expérimentation microonde sur la diffraction par des biréseaux métalliques de cavités hémisphéroïdales "
G. Gazoty, P. Sabouroux et R. Deleuil
C. R. Acad. Sci., ser. Iib, vol. 327, 1419-1422, **1999**
- [4] "Validation of 2D inverse scattering algorithms from multi-frequency experimental data"
K. Belkebir, S. Bonnard, F. Pezin, P. Sabouroux and M. Saillard
The Journal of Electromagnetic Wave and Applications, Vol 14, 1637-1667, **2000**
- [5] "A Metamaterial for Directive Emission"
S. Enoch, G. Tayeb, P. Sabouroux, N. Guérin, P. Vincent ,
Phys. Rev. Letter, Vol 89, Num 21, 213902, nov **2002**
- [6] "Electromagnetic scattering from rough metallic surfaces"
G. Gazoty, P. Sabouroux et R. Deleuil
IEEE Trans. on Antennas and Propagation, Vol 51, pp1669-1670, Num. 7, July **2003**
- [7] "Simplification de la procédure de mesure de caractéristiques électromagnétiques de matériaux en temps réel. "
P. Sabouroux et P.Boschi
Revue de l'Electricité et de l'Electronique (REE) – No.8, pp 84-89, septembre **2005**
- [8] "EpsiMu : un nouvel outil pour déterminer les caractéristiques électromagnétiques de matériaux dans le domaine des hyperfréquences. "
P. Sabouroux et P.Boschi
Revue de l'Electricité et de l'Electronique (REE) – No.10, novembre **2005**
- [9] " Free space experimental scattering database continuation: experimental set-up and measurement precision. "
J-M. Geffrin, P. Sabouroux and C. Eyraud
Inverse Problems (IoP), Vol. 21, N 6, pp S117-S130, December **2005**

- [10] "A Metallic Fabry-Perot Directive Antenna. "
N. Guérin, S. Enoch, G. Tayeb, P. Sabouroux, P. Vincent and H. Legay
IEEE Trans. AP, Vol. 54, No 1, january **2006**
- [11] "Amplitude and Phase Scattering in the Microwave Analogue (region) by Soot-like Aggregates Spheres. Comparison Theory and Experiments. "
P. Sabouroux, B. Stout, J. M. Geffrin, C. Eyraud, I Ayranci, R. Vaillon, N. Selcuk
Journ. of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, accepté, à paraître **2006**

Publications dans des Revues nationales avec comités de lecture.

- [12] "Possibilités expérimentales de la base de mesures sphérique en champ proche du Laboratoire de Radioélectricité à Marseille"
R. Deleuil, J. Dalmas, P. Sabouroux
Publication. du LMA n°145, **1997**, ISSN : 1159-0947, ISBN : 2-609669-09-2
- [13] "Approche Expérimentale pour les problèmes inverses en hyperfréquences"
P. Sabouroux, K. Belkebir
Publication du LMA n°148, **1998**, ISSN : 1159-0947, ISBN : 2-909669-11-4
- [14] "Approche Expérimentale pour les problèmes inverses en hyperfréquences"
K. Belkebir, P. Sabouroux, F. Pezin,
Publication du LMA n°154, **1999**, ISSN : 1159-0947, ISBN : 2-909669-18-1

Communications en congrès internationaux avec actes

- [15] "Experimental and theoretical comparison of photonic crystals transmission properties".
P. Sabouroux, G. Tayeb, D. Maystre et G. Kaul *Progress In Electromagnetics Research Symp. PIERS*, **1998**.
- [16] "Inversion of multi-frequency real data using domain or boundary approaches",
M. Saillard, K. Belkebir, S. Bonnard, P. Sabouroux,
Progress In Electromagnetics Research Symposium PIERS, 26^{ème} Assemblée Générale de l'Union Radio-Science Internationale URSI, Toronto, **1999**.
- [17] "Experimental Data Base for Validating Two-Dimensional Inverse Scattering Algorithms,
K. Belkebir, S. Bonnard, F. Pezin, P. Sabouroux, M. Saillard
Progress In Electromagnetics Research Symposium PIERS, Boston, **2000**.
- [18] "Compact directive antennas using metamaterials"
G. Tayeb, S. Enoch, P. Sabouroux, N. Guérin, P. Vincent,
JINA 2002, nov. **2002**
- [19] "Reflection and transmission of pulses at oblique incidence from stratified media"
F. Sagnard, P. Sabouroux, F. Tchoffo-Talom, G. El Zein, *Coll. Int. Optique Hertzienne et Diélectrique*, Calais, **2003**
- [20] "Resonant cavity antennas"
G. Benelli, S. Enoch, G. Tayeb, P. Vincent, J.-M. Geffrin, P. Sabouroux, H. Legay
European Space Agency Antenna Workshop, Espagne, mars **2004**
- [21] "DORT Method and time reversal as applied to subsurface electromagnetic probing"
M. Saillard, G. Micolau, H. Tortel, P. Sabouroux, J.-M. Geffrin, K. Belkebir, A. Dubois
URSI – Pise, Italie, mai **2004**
- [22] "3D Scattering Measurements, Validation with canonical targets"
J.-M. Geffrin, C. Eyraud, P. Sabouroux, H. Tortel
Mediterranean Microwave Symposium, Marseille, juin **2004**

- [23] "Time Reversal as applied to electromagnetic probing "
M Saillard, G. Micolau, H. Tortel, P. Sabouroux, J.M. Geffrin, K. Belkebir, A. Dubois
Mediterranean Microwave Symposium, Marseille, juin 2004
- [24] "High surface efficiency cavity antennas"
G. Benelli., S. Enoch, G. Tayeb, F. CapolinoC, J.M. Geffrin, P. Sabouroux, H. Legay
Mediterranean Microwave Symposium, Marseille, juin 2004
- [25] "EpsiMu : A New Microwave Materials Measurements Kit."
P. Sabouroux et P.Boschi
European Test and Telemetry Conference, Toulouse, juin 2005
- [26] "MIMO capacity simulation in cellular environment with a ray model"
S. Vergerio, J.P. Rossi, P. Sabouroux, J.M. Chaufray
European Test and Telemetry Conference, Toulouse, juin 2005
- [27] "Free Space Experimental Scattering Database Continuation: 2D Multi-Dielectric and Hybrid Targets"
J.M. Geffrin, C. Eyraud, P. Sabouroux
ANTEM, Saint Malo, France, juin 2005
- [28] "On the Accuracy of Scattering Measurements in Free Space: Random and Systematic Errors"
C. Eyraud, J.M. Geffrin, P. Sabouroux
ANTEM, Saint Malo, France, juin 2005
- [29] "An original Microwave Near-Field / Far-Field Spherical Setup : Application to Antennas and Scattered Fields Measurements"
P. Sabouroux, , J.M. Geffrin and C. Eyraud
An. Meeting And Symp. on the Antenna Measurement Techniques and Association, Newport RI. USA nov. 2005
- [30] "Validation of 3D Scattering Measurements"
J.M. Geffrin, C. Eyraud, P. Sabouroux, P. Chaumet, H. Tortel, H. Giovannini
IEEE-AP – URSI – Albuquerque, USA, july 2006

Communications en congrès nationaux avec actes

- [31] "Caractérisation large bande de matériaux absorbants."
P. Sabouroux, V. Vignéras-Lefebvre, J.P. Parneix et J.F. Escarmant *Journées d'études SEE - 1991*
- [32] "Modélisation de structures hétérogènes en vue de la conception de matériaux à propriétés électromagnétiques spécifiques."
V. Vignéras-Lefebvre, P. Sabouroux, A.M. Bottreau et J.P. Parneix *Journées Nationales Micro-ondes 1991*
- [33] "Caractérisation et modélisation d'absorbants large bande utilisant de nouveaux matériaux."
P. Sabouroux, V. Vignéras-Lefebvre, J.P. Parneix et A. Soum *Journées Nationales Micro-ondes (1991)*
- [34] "Mesures de signatures bistatiques radar de cibles complexes"
J. Dalmas, R. Deleuil et P. Sabouroux *Journées Nationales Micro-ondes, Saint Malo, Vol 97, 604-605, 1997.*

- [35] "Diffusion d'une onde électromagnétique plane par une surface bi-périodique parfaitement conductrice formée de cavités hémisphéroïdales."
G. Gazoty, R. Deleuil et P. Sabouroux, *Colloque Nat. de Rech. Univ., exemple des IUT, CNRIUT 1998*,
- [36] "Domaine d'investigation de la base de mesures sphérique en champ proche de Marseille."
P. Sabouroux, *Atelier CNES : Techniques et méthodes de mesures en antennes, Labège, décembre 1998*,
- [37] "Résultats expérimentaux sur la diffraction de biréseaux plans parfaitement conducteurs formés de cavités hémisphéroïdales"
P. Sabouroux, G. Gazoty et R. Deleuil., *Journée Nationales Microondes, Arcachon, mai 1999*
- [38] "Transmission optique en espace libre d'un signal hyperfréquence analogique"
P. Sabouroux et J.-L. Péré, *European Test and Telemetry Conference, Marseille juin 2001*
- [39] "Travaux Expérimentaux effectués par l'équipe Télédétection et Expérimentation Micro-onde de l'Institut Fresnel"
P. Sabouroux, *European Test and Telemetry Conference, Marseille, juin 2001*
- [40] "Étude et réalisation d'antennes directives"
N. Guérin, P. Sabouroux, S. Enoch, G. Tayeb, P. Vincent
Journées de Caractérisation Micro-ondes et Matériaux, Toulouse, mars 2002, p.163-166
- [41] "Cristaux photoniques et métamatériaux pour canaliser l'émission"
P. Sabouroux, Stefan Enoch, G. Tayeb, N. Guérin, P. Vincent
Journée Nationales Microondes, Lille, mai 2003
- [42] "Cristaux photoniques et métamatériaux pour des applications aux antennes planes"
P. Sabouroux, Stefan Enoch, G. Tayeb, N. Guérin, P. Vincent
European Test and Telemetry Conference, Toulouse, juin 2003
- [43] "Dispositifs Expérimentaux de l'équipe Télédétection et Expérimentation Micro-onde de l'Institut Fresnel. Application aux tests d'antennes et aux mesures de diagrammes de diffraction 2D et 3D"
P. Sabouroux, J.-M. Geffrin,
European Test and Telemetry Conference, Toulouse, juin 2003
- [44] "Mesures en champ proche de 2 à 26 GHz à l'Institut Fresnel "
C. Eyraud, J.-M. Geffrin, P. Sabouroux, *Session plénière du GdR Ondes, Marseille, décembre 2003*
- [45] "Base de données expérimentale de l'Institut Fresnel pour l'inversion en espace libre"
K. Belkebir C. Eyraud, J.-M. Geffrin, P. Sabouroux, *Session plénière du GdR Ondes, Marseille, décembre 2003*
- [46] "Etude et réalisation d'antennes directives et compactes"
N. Guérin, P. Sabouroux, S. Enoch, G. Tayeb, P. Vincent,
JCMM 2004, La Rochelle, avril 2004
- [47] "Caractérisation des particules de Suie dans les Moteurs Aéronautiques : Projet CAPAS"
P. Desgroux, Y. Bouvier, E. Therssen, A. Coppalle, M. Weill, R. Vaillon, F. André, D. Escudie et P. Sabouroux
Atelier Observatoire de Paris : Physique des poussières durant l'évolution stellaire. Meudon, octobre 2004

- [48] "Mesure de caractéristiques électromagnétiques de matériaux en temps quasi-réel : *EpsiMu*"
P. Sabouroux
JCMM 2006, Saint Etienne, mars 2006

Rapports de contrats

- [49] "Pré-étude de filets de camouflages ayant des spécificités radar."
P. Sabouroux et J.P. Parneix,
Rapport final, BARRACUDA Industries Nouvelles, juillet 1992.
- [50] "Caractérisation de systèmes de camouflage ayant des spécificités d'atténuation des ondes électromagnétiques radar."
P. Sabouroux et J.P. Parneix.
Rapport final, BARRACUDA Industries Nouvelles, décembre 1992.
- [51] "Réalisation d'absorbants micro-ondes."
P. Sabouroux et J.P. Parneix.
Rapport final relatif au contrat d'études avec la DCN. de Toulon, septembre 1991.
- [52] "Corrélations entre mesures et calculs portant sur la diffusion multiple par des ellipsoïdes de révolution allongés."
P. Sabouroux,
Rapport interne, Laboratoire Radioélectricité, Canadian Space Agency à Ottawa, 1996
- [53] "Atelier - S.E.R. MARSEILLE 94"
P. Sabouroux et R. Deleuil, *contrat DRET n° 94.1159/A000/DRET/DS/SR), 1995*
- [54] "Caractérisation hyperfréquence de matériaux"
P. Sabouroux et R. Deleuil, *Rapport final, Contrat DCN n° S 9577374997, 1995*
- [55] "Multifrequency experimental Data for inverse scattering problems."
P. Sabouroux, *Cas n°5, Atelier Electromagnétique - JINA 1998*
- [56] "Antennes à réseaux B.I.P."
P. Vincent, S. Enoch, G. Tayeb, P. Sabouroux, JM. Geffrin.
Collaboration Alcatel-Toulouse / CLARTE / TEM
Phase 1 : mai 2001
Phase 2 : septembre 2002
Phase 3 : juillet 2003
Phase 4 : janvier 2004
- [57] "Antennes MWH535 et SEHTI"
P. Sabouroux, *Rapport de Contrat, Centre d'étude des Environnements Terrestre et Planétaires (CETP) – 2002*
- [58] "Mesures de caractéristiques électromagnétiques de matériaux. Application à des revêtements multicouches"
P. Sabouroux, H. Tortel
Rapport de Contrat, Société POLYBRON – 2002
- [59] "Etude des systèmes de mesure de SER en basse fréquence"
P. Sabouroux, *Rapport de Contrat, Dassault Aviation – 2002*
- [60] "Elaboration d'un moyen de mesures de caractéristiques électromagnétiques de matériaux pour des besoins industriels : kit de mesures "Epsilon-mètre"."
P. Sabouroux, *Rapport de fin de programme, Oséo Anvar – janvier 2005*

Conclusion Générale.

Depuis 1993, année de mon entrée à l'Université de Provence, je me suis toujours appliqué à développer des bancs de mesures toujours plus originaux, c'est-à-dire proposant des géométries expérimentales toujours plus innovantes. Dans tous les cas, mon unique objectif est de promouvoir l'approche des phénomènes physiques en électromagnétisme par des voies expérimentales. Cette approche étant très appliquée, de nombreuses collaborations ont vu le jour entre notre équipe SEMO et plusieurs équipes ou laboratoires nationaux ou internationaux. A titre d'exemple, nous avons mis en place ces dernières années un **Programme d'Action Intégrée (PAI)** dans le cadre d'une convention avec l'association *Egide* pour établir une collaboration avec l'université de Gand en Belgique. Le sujet de nos recherches communes était la caractérisation de barres métalliques dans des dalles de bétons. Dans ce contexte, deux campagnes de mesures ont été effectuées à Gand ainsi qu'à Marseille. Les résultats sont en cours d'exploitation dans les deux laboratoires et seront présentés notamment dans le mémoire de thèse de Mademoiselle Christelle Eyraud (octobre 2006).

Aujourd'hui, en 2006, nous pouvons dire sans être prétentieux, que nous maîtrisons les moyens micro-ondes que nous possédons. Dans ce contexte et dans le souci d'aller de l'avant, nous avons étudié de nouveaux projets avec un nouveau scanner double plan²⁴ qui a fait l'objet d'un dossier de multi-financement dans le cadre d'un projet FEDER. Notre projet a été largement soutenu d'une part par plusieurs laboratoires ou industriels (Supélec-LSS, ESA, Société des Eaux de Marseille, IETR-INSA, Alcatel, Dassault Aviation, France Telecom, CETHIL, INRA, Université de Gand) en nous manifestant leur intérêt à l'aide d'un document écrit et d'autre part les collectivités locales avec une importante participation financière. Enfin, le CNRS nous a octroyé un financement exceptionnel tout en soulignant l'intérêt majeur de ce projet de plate forme expérimentale avec les thématiques associées. Dans ces conditions, ces nouveaux et importants moyens disponibles entièrement à l'équipe nous permettront d'accroître les capacités d'accueil d'étudiants en troisième cycle en formation par la recherche et ainsi de développer de nouveaux axes de recherches.

²⁴ Le scanner double plan sera intégré dans une petite chambre anéchoïque cubique de 3.20 m d'arête. Ce scanner double sera équipé de deux positionneurs mécaniques plans superposés. Une antenne sera fixée sur chacun des positionneurs et décrira un plan horizontal. L'objectif majeur de ce nouvel ensemble est de mesurer la réflectivité d'un milieu plan pour effectuer des détections d'objets enfouis. Ce nouveau moyen est principalement conçu pour répondre aux questions posées et décrites dans la partie de ce mémoire relatives aux perspectives. Enfin, ce moyen est en cours de finalisation avec une installation prévue dans le courant de l'été 2006.

Bibliographie

- [Bai] BAILEY A.E., Microwave Measurement, Peter Peregrinus, 1985
- [Bal] BALANIS C., Antenna Theory, Analysis and Design, John Wiley & Sons, 1997
- [Boh] BOHREN C.F., HUFFMANN E.R., Absorption and Scattering of Light by Small Particles. New York: Wiley, 1983.
- [Bou] BOUCHE D. et MOLINET F., Méthodes Asymptotiques en électromagnétisme, Springer Verlag, 1994
- [Bru] BRUNING J. and LO Y. Multiple scattering of EM waves by spheres, Part I and II, IEEE Trans. Ant. and Prop. 19, p. 378-400, 1971
- [Cho] CHOCS, Revue Scientifique et technique de la Direction des Applications Militaires, n°8, septembre 1993
- [Coe] COELHO R., ALADENIZE B. Les diélectriques, Hermès, 1993
- [Cot] COTE M.G., Automated swept-angle bistatic scattering measurements using continuous wave radar, IEEE Trans. on Inst. And Applic. Vol .41, 2, p.185-192, 1992
- [Cri] CRISPIN J.W. and SIEGEL K.M., Methods of Radar Cross-Section Analysis, Academic Press New, 1968
- [Dal1] DALMAS J. et DELEUIL R., Diffusion multiple en zone proche par deux sphères métalliques inégales, Journées Int . de Nice sur les Antennes 96, p. 201-203, 1996
- [Dal2] DALMAS J., DELEUIL R. et SABOUROUX P., Mesures de Signatures bistatiques radar de cibles complexes, Actes JNM, 97 Saint Malo, p. 604-605, 1997
- [Dar] DARRICAU J., Physique et Théorie du Radar, Sodipe, 1981
- [DiFr] DiFRANCO J.V. and RUBIN W.L, Radar Detection, Printince Hall, Inc, 1968
- [Eno1] ENOCH S., TAYEB G. and MAYSTRE D., Numerical evidence of ultrarefractive optics in photonic crystals, Optics Communications, 161, 47-55, 1999
- [Eno2] ENOCH S., TAYEB G. and MAYSTRE D., Dispersion Diagrams of Bloch Modes Applied to the Design of Directive Sources, Progress In Electromagnetics Research, PIER 41, p. 61-81, 2003
- [Fel] FELBACQ D., TAYEB G. and Maystre D. Scattering by a random set of parallel cylinders, J. Opt. Soc. Am. A, Vol. 11, No.9, p.2526-2538, 1994.
- [For] FORTUNY J., Efficient algorithms for three-dimensional near-field synthetic aperture radar imaging, Universität Karlsruhe, Fak. f. Elektrotechnik und Informationstechnik. Diss. v. 21.05.2001
- [Gaz1] GAZOTY G. DELEUIL R., Diffraction d'une onde électromagnétique plane par un biréseau métallique plan formé de cavités hémisphéroïdales, C.R. Acad. Sci. Paris, t. 327, Série II b, p. 555-558, 1999
- [Gaz2] GAZOTY G., Diffraction d'une onde électromagnétique plane par une surface bipériodique parfaitement conductrice formée cavités hémisphéroïdales, Mémoire de Thèse, Université de Provence, 1998
- [Gra] GRAEME L.J., Geometry theory of diffraction for electromagnetic waves, Peter Peregrinus, 1980

- [Gral] GRALAK B., ENOCH S., TAYEB G., Anomalous refractive properties of photonic crystals., Journal of Optical Society of America A 17, p.1012-1020, 2000
- [Gür] GÜREL L., BAGCIH., CASTELLI J.C., CHERALY A., TARDIVEL F. ,Validation through comparison: Measurement and Calculation of the Bistatic Radar Cross Section (BRCS) of Stealth Target. RadioScience Vol. 38, n°3, p. 12-1 - 12-10, june 2003
- [Han] HANSEN J.E., Spherical Near-Field Antenna Measurements, Peter Peregrinus, 1988
- [Hau] HAUSER D., PODVIN T., DECHAMBRE M., VALENTIN R., CAUDAL G., DALOZE J-F., STORM : A new airborne polarimetric real-aperture radar for earth observation, ESA/SERIN, Frascati, 14-16 January 2003,
- [Kno] KNOTT E.F., SCHAEFFER J.F., TULEY M.T., Radar Cross Section. Artech House, 2nd edition, 1993
- [Jas] JASIK H., Antenna Engineering handbook, McGraw-Hill Book Comp., 1961
- [Le] LE Y.T. and LEE S.W., Antenna Handbook, Theory, Applications and Design, Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1988
- [McG] McGAHAN R.V. and KLEINMAN R.E., Special session on image reconstruction using real data, IEEE Antennas and Propagation mMagazine, Vol 38, No.3, 1996
- [May] MAYSTRE D., Electromagnetic study of photonic band gaps, Pure Appl. Opt., 3, p.975-993, 1994
- [Mou] MOUCHE A., HAUSER D., DALOZE J-F. and GUERIN C., Dual-polarization measurements at C-band over the ocean: results from airborne radar observations and comparison with ENVISAT ASAR data, IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 43 No 4, p. 753- 769, April 2005
- [Pen] PENDRY J. B., Negative refraction makes a perfect lens, Phys. Rev. Lett., 85, 3966 2000
- [Ruc] RUCK G.T., BARRICK D.E., STUART W.D. and KRICKBAUM C.K., Radar Cross Section Handbook, Plenum Press 1970
- [She1] SHELBY R., SMITH D.R. and SCHULTZ S., Experimental verification of a negative index of refraction, Science, 292, 77, 2001
- [She2] SHELBY R., SMITH D.R., NEMAT-NASSER S.C. and SCHULTZ S., Microwave transmission through a two-dimensional, isotropic, left-handed metamaterial, Appl. Phys. Lett., 78, 4 2001
- [Sto] STOUT B., AUGER J.C., LAFAIT J., Individual and aggregate scattering matrices and cross sections : conservation laws and reciprocity, Journal of Modern Optics, 48, No.14 pp. 2105-2128, 2001.
- [Str] STRATTON J.A., Electromagnetic Theory, McGraw-Hill Book Company, 1941
- [Tay] TAYEB G., MAYSTRE D. Rigorous theoretical study of finite size two-dimensional photonic crystals doped by microcavities. J. Opt. Soc. Am. A 14, p.3323-3332, 1997.
- [Tor] TORO E. and DELEUIL R., Application of a rigorous modal theory to electromagnetic diffraction from a biperiodic rough surface, IEEE T. Ant. Propag. Vol. AP-33, N°5, may 1985
- [Tsa] TSANG L., KONG J.A. and SHIN R.T., Theory of Microwave Remote Sensing, John Wiley & Sons, 1985.

- [Van] VAN DE HULST H.C. Light Scattering by small particles, Dover Publications, Inc. New York, 1981
- [VdB] VAN DEN BERG, COTE M.G. and R.E. KLEINMAN, "Blind" shape reconstruction from experimental data, IEEE Trans. On Antenna and Propag. Vol.43, No 12, 1995
- [Ves] VESELAGO V.G., The electrodynamics of substances with simultaneously negative value of ϵ and m , Sov. Phys. Usp. 10, 509-514, 1968

Remarque.: Des références complémentaires sont à la fin des articles publiés dans ce mémoire.

Annexes

Annexes A : Description de la base de mesure

Historique de la base :

- 1993-1995 : Tests de la chaîne de mesure utilisant un analyseur de réseau HP8510C suivant les multiples configurations : mesures locales de matrice [S], avec les mélangeurs déportés en sources multiples. Finalisation de l'étude de la cage de faraday anéchoïque de la base.
- 1995-1996 : Installation de la base de mesures sphérique dans un local situé à la Valbarelle Marseille 11^{ème}.
- 1998 Réaménagement de la base sur le site de IUSTI durant l'été 1998.
- 1999 Etude et Installation du double positionneur en site sur l'arche circulaire.
- 2005 Tests d'une nouvelle chaîne dans l'objectif d'un changement prochain du récepteur hyperfréquences.

Implications personnelles dans cette base.

Dès mon arrivée à l'Université de Marseille, je me suis occupé dans un premier temps, en collaboration avec Monsieur Deleuil, à finaliser le projet de la chambre anéchoïque. Puis dans un deuxième temps, j'ai exploité cette base avec les campagnes de mesures décrites dans ce mémoires. En parallèle à l'exploitation scientifique de cette infrastructure, j'ai du prévoir toutes les évolutions nécessaires pour répondre aux thématiques de recherches émergentes. Dans ces conditions, la plus importante des évolutions de cette base sphérique fut la mise en place d'un système de double positionneur constitué par un couple de chariots se déplaçant sur l'arche circulaire. Avec le réaménagement en juillet 1998 dans les locaux de IUSTI sur le Technopôle de Château Gombert, l'installation de ces deux chariots fût la plus importante des évolutions de cette base. J'ai pu étudier le projet du double positionneur en site en partenariat avec la société SIEPEL basée à la Trinité sur Mer (dpt 56). Ces positionneurs furent financés avec des crédits exceptionnels CNRS. Depuis, cette installation présente un nombre de degrés de liberté important (quatre principaux, trois secondaires pour effectuer des alignements).

Description du dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est un constitué d'un ensemble de positionneurs mécaniques implantés dans cage de Faraday anéchoïque ou autrement appelée simplement chambre anéchoïque. Les dimensions internes de la chambre sont 14.50 m de long, 6.50 m de large et 6.50 m de haut. Les positionneurs mécaniques sont regroupés en trois groupes principaux (figure A1).

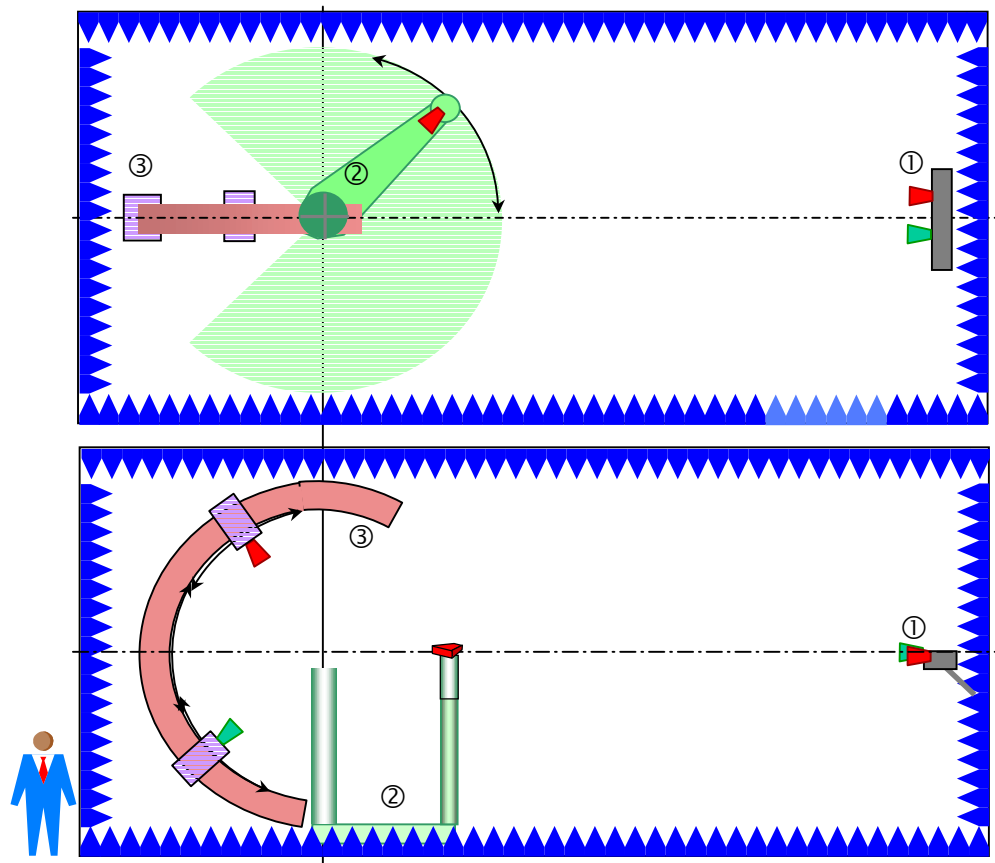


Figure A1 : plan de masse de la grande chambre et principe des positionneurs

- ① positionneur quasimonostatique
- ② positionneur azimuthal
- ③ positionneur en site

Le premier groupe (①) correspond au positionneur à 10 mètres de la cible pour effectuer des mesures de SER ou des mesures d'antennes à 10 mètres. Le groupe 2 (②) concerne les positionneurs azimuthaux : le positionneur central supporte la cible sous test ou l'antenne sous test, le second positionneur de ce groupe met en mouvement le bras azimuthal permettant à une antenne de décrire une trajectoire circulaire centrée sur l'origine du repère du système. Enfin le troisième groupe (③) concerne les deux chariots décrivant des trajectoires circulaires centrées sur le centre du repère sphérique du système dans un plan vertical, c'est à dire le plan de site.

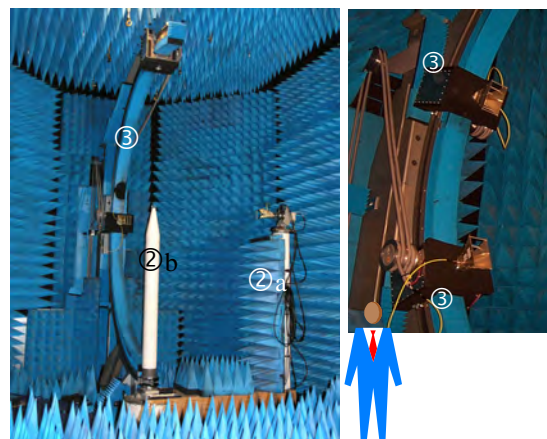


Figure A2 : photographies des positionneurs

- ②a positionneur azimuthal récepteur
- ②b positionneur cible ou antenne sous test
- ③ positionneurs en site

La chaîne de mesure utilise un analyseur de réseau vectoriel hyperfréquence (HP8510C) fonctionnant en sources multiples avec les mélangeurs déportés et ramenés au niveau des antennes pour limiter les pertes et les incertitudes de mesures engendrées par les longueurs importantes des câbles coaxiaux.

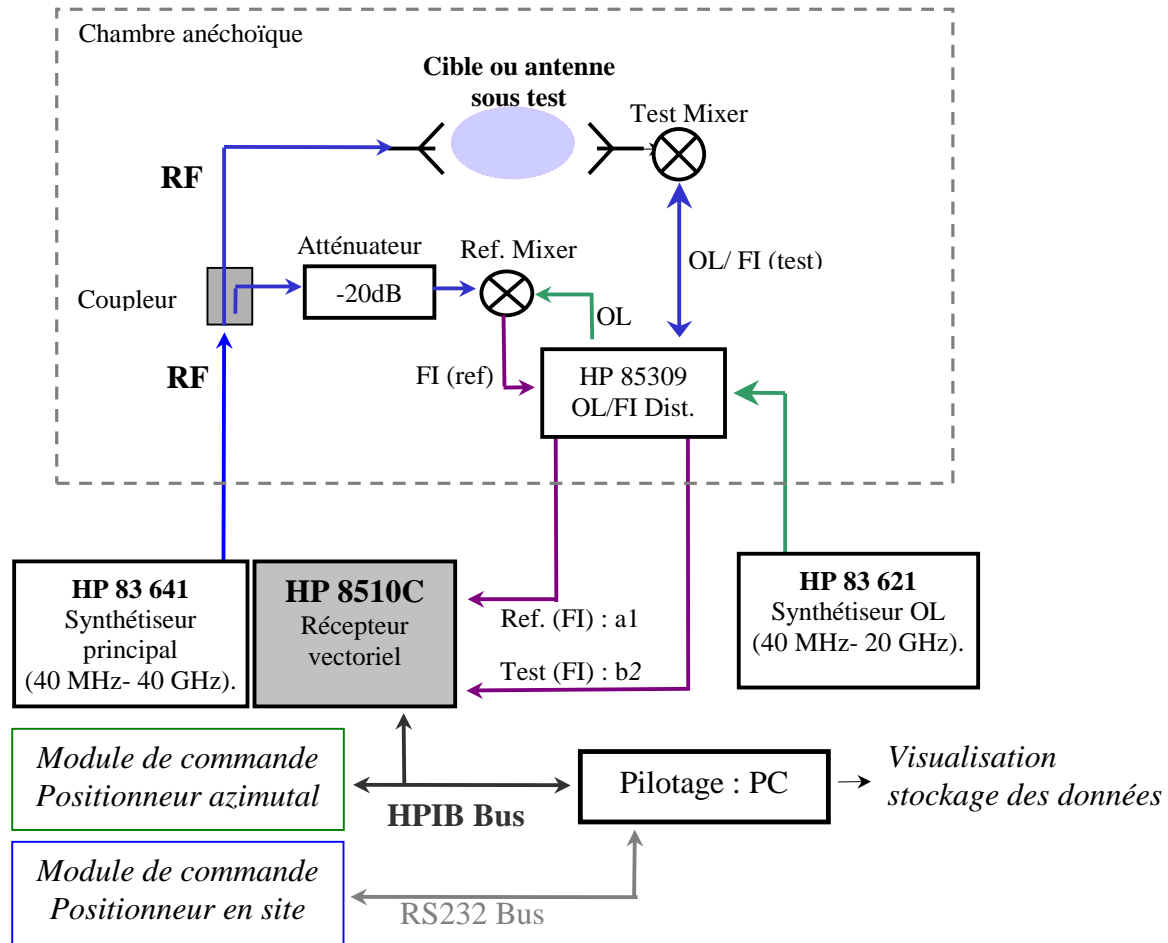


Figure A3 : synoptique de la chaîne de mesures.

OL : Oscillateur Local

FI : Fréquence Intermédiaire (20 MHz)

RF : signal Incident hyperfréquence

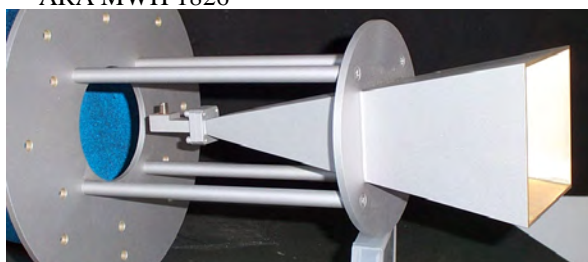
FI (ref) et FI (test) : Signal de référence et de test en fréquence intermédiaire

OL/FI Dist : module de distribution d'OL et de centralisation des signaux IF

Plusieurs antennes sont disponibles (figure A4) suivant les cas d'études et les bandes de fréquences associées. Dans le cas où nous travaillons sur une large bande de fréquences, nous utilisons une antenne de type cornet large bande "double ridged" polarisée rectilignement (ARA DRG 118A). Cette antenne fonctionne entre 1 et 18 GHz. Cependant, les caractéristiques ne sont pas optimum suivant les fréquences notamment en basse fréquence (vers 1 GHz) où le diagramme de directivité est très ouvert alors que vers le haut de la bande, il est très étroit mais avec des niveaux de lobes secondaires plus élevés. Cependant, dans une

grande partie des cas, cette antenne répond parfaitement à nos besoins. Nous possédons aussi des antennes de type cornets pyramidaux fonctionnant sur les bandes X (8.2-12.4 GHz) (non représentées sur la figure), Ku (12-18 GHz) et K (18-26.5 GHz). Enfin, nous possédons un couple d'antennes à réflecteurs paraboliques avec des sources large bande (4-8 GHz). Ces antennes ont été étudiées suite à un cahier des charges que nous avons établi. La société qui a fabriqué ce couple d'antennes est la société HYPTRA située dans le Calvados.

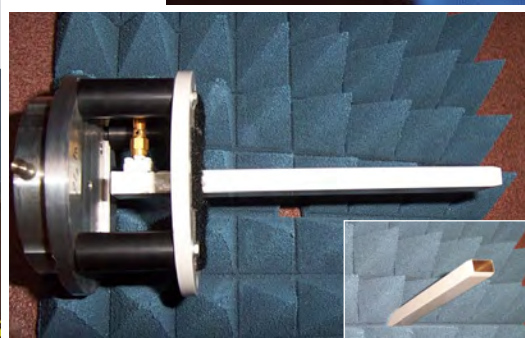
Antenne cornet bande K
18 GHz – 26 GHz
ARA MWH 1826



Cornet double ridge
1 GHz - 18 GHz
ARA DRG118A



Antenne à réflecteur parabolique large
bande : 4 GHz - 8 GHz
HYPTRA NE5256



Sonde Ku guide ouvert
12 GHz - 18 GHz
NSI-RF-WR62

Figure A4 : Antennes disponibles

Annexe B : Principe de la mesure vectorielle de champs diffractés.

Le protocole de mesure mis en œuvre et décrit précédemment dans ce mémoire nous permet d'obtenir sous forme complexe (mesure vectorielle) le module et la phase du champ diffracté par une cible (simple (sphère) ou complexe (agrégat)...). Ce champ diffracté est obtenu à partir de la soustraction vectorielle des mesures de deux champs électromagnétiques. Le premier correspond à un champ total mesuré en présence de la cible et est constitué par la superposition du champ incident et du champ diffracté. Le second est simplement le champ incident mesuré en retirant la cible du centre du dispositif. Dans ces conditions, pour chaque fréquence, et pour chaque position angulaire, la valeur du champ complexe diffracté est le résultat de la soustraction vectorielle entre le champ total (avec la cible) et incident (sans la cible). En outre, un calibrage des mesures effectuées à partir de la mesure sur une cible de référence (dans notre cas une sphère métallique) permet de prendre en compte les différentes dérives de la chaîne de mesures et surtout de référencer les niveaux. Mais avant d'aller plus loin nous pouvons nous poser la question : comment mesurer des grandeurs vectorielles (modules et phases) correspondantes à des champs électromagnétiques rayonnés ?

Evolutions des chaînes de mesures hyperfréquences : du 8510 au 37000 ...

Pour bien comprendre la mesure des grandeurs vectorielles (modules et phases) correspondantes à des champs électromagnétiques rayonnés, il est très important d'avoir quelques repères historiques et techniques relatifs aux différentes architectures des analyseurs de réseau. C'est pour ces raisons que je vais rappeler quelques éléments clefs.

Depuis les débuts de l'utilisation des analyseurs vectoriels de réseau (ou **Vector Network Analyser : VNA**) dans les années 80, la structure, l'architecture intrinsèque de ces derniers a profondément évolué. Initialement, ces appareils étaient modulaires avec des tiroirs électroniques séparés pour les différents modules de la chaîne : un tiroir pour le générateur (ou le synthétiseur), un pour la séparation des signaux et la transposition en fréquences intermédiaires, un pour le récepteur et un pour la gestion de l'ensemble et pour la visualisation finale. Ce fut la première génération de ce type d'appareils. A l'époque de cette première génération, deux modèles se partageaient le marché global : le 8510 de Hewlett Packard qui fut ensuite Agilent Technologies et le 360 de Wiltron qui fut ensuite Anritsu.

Ces appareils, outre le fait qu'ils soient complexes, étaient extrêmement onéreux (environ un million de francs). Pour palier à ces limitations et répondre à un besoin toujours

grandissant par les organismes de recherches privés ou publics, des modèles compacts virent le jour. Ces appareils regroupaient dans un même châssis l'ensemble des modules nécessaires à une chaîne de mesures vectorielle à savoir le synthétiseur, l'étage de séparation des signaux, l'étage de transposition des fréquences, le récepteur de fréquence intermédiaire (FI) et enfin l'étage de gestion et de visualisation. Ce fut la deuxième génération d'analyseur de réseau toujours régie par les deux fabricants Agilent et Anritsu. Les modèles sont alors plus nombreux suivant les bandes de fréquences étudiées.

Aujourd'hui, cette seconde génération a tendance à laisser la place à la troisième et dernière. Cette nouvelle génération présente de nouvelles plates-formes d'appareils regroupant dans un même châssis, une chaîne de mesures d'analyseur vectoriel de réseau ainsi qu'un ordinateur. Dans ces conditions, l'utilisateur a accès à l'appareil de mesure uniquement via une Interface Homme Machine informatique. Cette nouvelle génération d'appareils est marquée par l'apparition d'un nouveau fabricant : Rhodes et Schwarz.

Cependant, tous ces analyseurs de réseau sont dédiés à des mesures de matrices $[S]$ de composants locaux à savoir des composants pour lesquels des lignes d'accès hyperfréquences de dimensions réduites à partir des plans de calibrages sont nécessaires. A titre d'exemples, je citerai des composants discrets hyperfréquences comme tous les composants en guides d'ondes, des composants sérigraphiés sur des substrats (transistors, diodes, circuits plaqués)... Par contre, dès lors que les distances entre les plans de références de phases définis par calibrage classique et les composants à mesurer sont grandes, la chaîne de mesures classique est mise en défaut et de ce fait une nouvelle structure est alors nécessaire : les étages de séparation des signaux et de transposition de fréquences sont déportés à proximité des composants à mesurer. Dans ces conditions, un deuxième générateur est utilisé pour fournir le signal d'oscillateur local nécessaire à la transposition des fréquences. Dans ces nouvelles conditions seul un paramètre de la matrice S n'est accessible à savoir b_2/a_1 ou encore (Signal Test) / (signal référence). Il est alors fondamental de souligner que ce sont des mesures relatives entre une référence a_1 et un signal issu du dispositif sous test à mesurer b_2 . Dans ce cas de figure, seul la configuration de mesure indiquera si la grandeur mesurée est relative à une réflexion (cas de la SER) ou à une transmission (cas de la diffraction multi-statique ou de la caractérisation d'antennes).

Hier, ce type de configuration était réservé à des organismes ayant d'important moyens financiers car outre l'analyseur classique modulaire, il était nécessaire d'acquérir un deuxième synthétiseur et tous les modules externes (mélangeurs, coupleurs...). Aujourd'hui, avec les

nouvelles générations d'appareils, l'architecture est simplifiée car un simple analyseur de réseau basse fréquence utilisé en récepteur vectoriel IF associé à deux synthétiseurs (un principal et un fournissant l'oscillateur local) est suffisant. Cette nouvelle architecture de chaîne de mesure vectorielle n'est pas jusqu'à aujourd'hui commune et actuellement les différents fabricants sont encore dans une phase de validation de leur chaîne.

D'ailleurs, nous avons été confrontés à ce problème pour acquérir un nouvel analyseur de réseau au sein du laboratoire. Ainsi, avant d'acquérir nos nouveaux moyens de mesures, nous avons testé l'ensemble des différents appareils disponibles des générations actuelles (compacts) et nouvelles (compacts associés à un ordinateur interne) : Agilents avec la gamme des PNA (Precision Network analyzer), Rhodes et Schwartz avec la gamme des ZVRE (6GHz), ZVM (20GHz) et ZVK(40GHz) et Anritsu avec les gammes des Scorpions (9GHz) et 37xxx. Tous ces analyseurs ont été associés à un ou deux synthétiseurs externes pour constituer une chaîne de mesures à sources multiples et mélangeurs déportés. Dans le premier cas, où on utilise un seul synthétiseur externe pour délivrer le signal d'OL, le signal hyperfréquence est alors délivré par le synthétiseur interne à l'analyseur de réseau compact (la limite de la fréquence haute disponible est alors fixée par celle du synthétiseur hyperfréquence interne). Pour utiliser alors cette configuration, il est obligatoire d'avoir accès, via des ouvertures externes des boucles hyperfréquence de l'analyseur. Cette configuration est en fait disponible grâce à des options sur les appareils. Seul le R&S n'a pas prévu ce type de fonctionnement. Dans ces conditions, deux synthétiseurs externes sont nécessaires : un pour le signal hyperfréquence et un pour le signal d'OL.

Ainsi, dans ces conditions, nous avons pu mettre en valeurs les principaux atouts de nouveaux modèles (rapidité de mesures, précision) et des caractéristiques à faire évoluer.

Nous avons regroupé dans la figure B1, les différentes configurations des structures des chaînes de mesures multiples sources à mélangeurs déportés utilisant des analyseurs de réseau compacts avec un synthétiseur interne. Nous avons deux familles globales de structures. La première utilisant un VNA compact basse fréquence (il ne joue alors le rôle que de récepteur de fréquence intermédiaire²⁵). Il est associé à deux synthétiseurs externes. La deuxième famille utilise un VNA hyperfréquences : le VNA joue alors le rôle de récepteur de fréquence

²⁵ Un récepteur de fréquence intermédiaire n'est ni plus ni moins qu'un oscilloscope. En effet, les fréquences des signaux dits de fréquences intermédiaires sont comprises entre 8MHz et 50MHz. Ces signaux ne sont en fait que de simples sinusoïdes déphasées entre elles et plus ou moins atténuées. Ils sont issus des transpositions superhétérodynes à fréquence fixe (fréquence intermédiaire) des signaux hyperfréquences à l'aide de mélangeurs hyperfréquences (mixers).

intermédiaire mais aussi de générateur lorsque le synthétiseur interne est utilisé en tant que générateur principal hyperfréquence. Dans ces conditions, un seul synthétiseur externe est nécessaire pour délivrer le signal d'oscillateur local. Enfin, parallèlement à ces deux familles, Il existe le cas particulier de l'utilisation d'un analyseur de réseau compact de dernière génération, associé à des options fabricants, qui permet de s'affranchir de synthétiseur externe. En effet, dans certaines conditions, il est alors possible d'ouvrir une deuxième boucle externe du VNA pour avoir un accès direct au signal d'oscillateur local. Cependant, cette dernière structure n'est pas simple à mettre en œuvre (nous l'avons testé au laboratoire en présence des responsables techniques du fournisseur) et doit être largement optimisée et validée pour être proposée à des futurs utilisateurs.

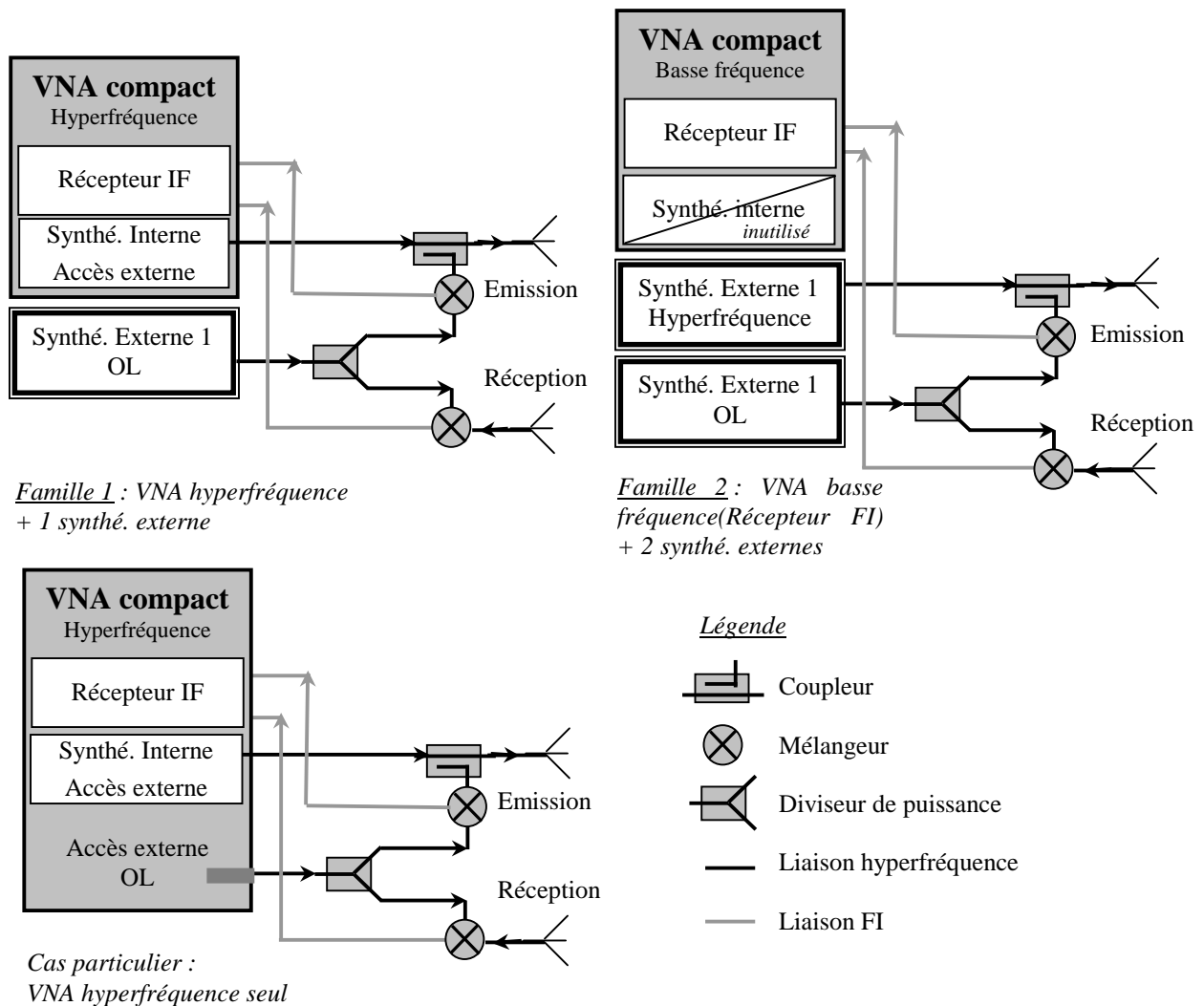


Figure B1 : synoptiques des deux familles de configurations pour effectuer des mesures de champs rayonnés.

En outre, le déport des mélangeurs proches des antennes est effectué pour limiter les atténuations dans les câbles hyperfréquences qui souvent présentent des longueurs importantes. Ces longueurs importantes engendrent des instabilités sur les termes de phases qui rendent les mesures inexploitable.

Actuellement, notre système, utilisant un HP8510C, se rapproche de la famille 2. Nous rappelons que le synoptique précis est visible sur la figure A3. Un module supplémentaire, le 85309 a plusieurs rôles. Il fait office, dans un premier temps de diviseur de puissance pour répartir le signal d'oscillateur local vers les deux mélangeurs, dans un second temps, il collecte les signaux FI de référence et de test avant de les envoyer vers l'analyseur de réseau (récepteur FI). Enfin, ce module gère une boucle de régulation de gain de sorte que les deux mélangeurs opèrent dans des plages de fonctionnement similaires et optimum.

Enfin, nos derniers équipements acquis ces derniers mois, a savoir un analyseur de réseau hyperfréquence (40GHz), un synthétiseur hyperfréquence (40GHz) et enfin un deuxième analyseur de réseau vectoriel basse fréquence (9GHz) nous permettent aujourd'hui tous les types de configurations présentés.

Annexe C : Configurations géométriques

Considérant l'ensemble des positionneurs mécaniques présents dans la chambre anéchoïque, nous nous rendons compte assez rapidement du nombre important de possibilités géométriques pour les expérimentations à effectuer. Donc, pour décrire les configurations géométriques qui sont utilisées dans la base il faut considérer deux caractéristiques. D'une part la géométrie des trajectoires des antennes et d'autre part les directions de propagation des ondes électromagnétiques incidentes et diffractées.

En ce qui concerne les géométries des trajectoires des antennes, on trouve classiquement trois configurations : la configuration sphérique, cylindrique et plane. Actuellement, nous utilisons dans la grande chambre anéchoïque la configuration sphérique. En effet, les antennes d'émission et de réception suivent des trajectoires circulaires dans les deux plans vertical (plan de site) et horizontal (plan d'azimut) autour d'un point central O (figure C1). Dans le cas d'une mesure de diffraction, la cible est alignée sur ce point central : le centre du référentiel sphérique.

En ce qui concerne les directions de propagation des ondes incidentes et diffractées nous pouvons identifier deux angles θ_e et θ_r qui correspondent respectivement aux directions d'émission et de diffraction. Ces directions peuvent être soit dans le plan de site soit dans le plan d'azimut. Tous les cas de figures sont possibles car il n'y a pas de positionneur dédié à l'antenne d'émission ou de réception.

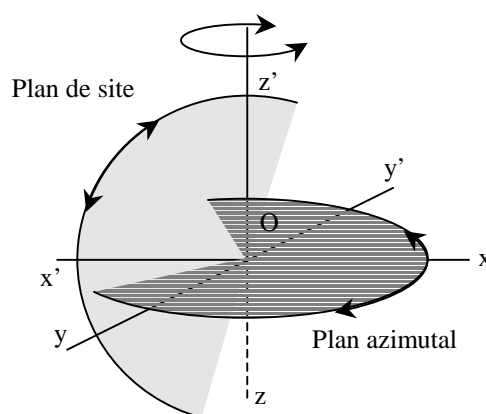


Figure C1 : Trajectoires des antennes dans la base sphérique.
Plan de site (gris clair) course de -10° à 170°
Plan azimutal (gris foncé) de 60 à 300°

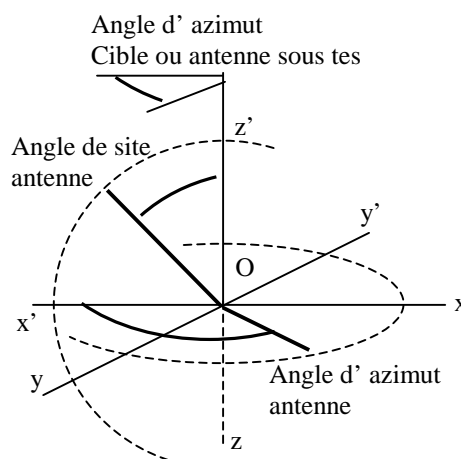


Figure C2 : convention angulaire de la base sphérique

Trois cas principaux se présentent.

1. Le premier correspond au **cas monostatique** ou quasi-monostatique (figure C3). Ce cas ne concerne pas les positionneurs en site ou en azimut d'antennes. En effet, dans cette configuration l'antenne (cas monostatique) ou les antennes (cas quasi-monostatique) sont positionnées d'une manière fixe ; seule la cible est orientée suivant une direction donnée par rapport à la direction des antennes. Cette configuration est utilisée pour les mesures de SER. Nous avons alors $\theta_e = \theta_r$ dans le cas où nous utilisons une seule antenne associée à une chaîne de mesures fonctionnant en régime découpé c'est à dire avec un dispositif de commutation des voies d'émission et de réception. Dans notre cas, nous n'avons pas de tiroir de découpe et nous utilisons un régime d'ondes entretenues. Dans ces conditions, nous ne pouvons pas commuter les voies d'émission et de réception. Ainsi nous sommes obligés d'utiliser deux antennes distinctes : une pour l'émission et une pour la réception. Dans ces conditions, la condition $\theta_e = \theta_r$ n'est pas réalisable. Ainsi pour palier à ce problème nous utilisons deux angles θ_e et θ_r très faibles, ce qui permet d'avoir une configuration quasi-monostatique.

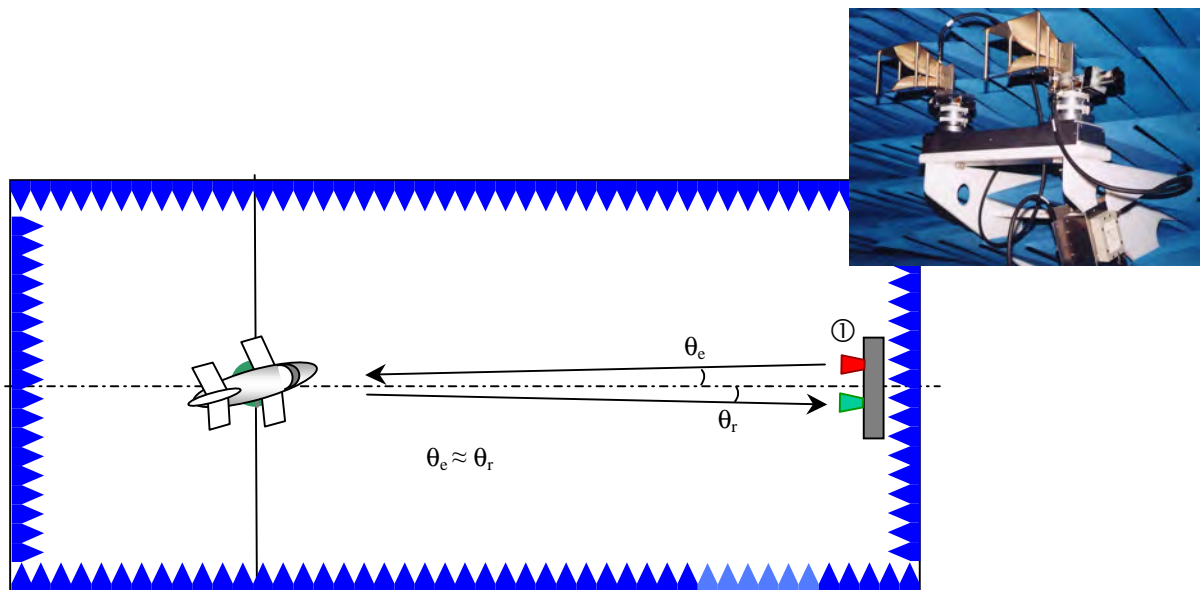


Figure C3 : configuration quasi-monostatique.

La photographie représente le couple d'antennes ARA DRG118A sur le positionneur quasi-monostatique. Différents réglages sont possibles pour aligner les axes des deux antennes sur le centre de l'axe de rotation de la cible. Enfin, pour conclure sur ce cas, cette configuration est dite la configuration base longue.

2. Le deuxième correspond au cas où θ_e est différent de θ_r dans le même plan généralement azimutal. Les deux angles de site sont alors égaux à 90° . Cette configuration est dite **bistatique**. Ce cas utilise les positionneurs de la base sphérique (figure C4a)

3. Enfin le troisième cas est légèrement similaire au cas bistatique mais avec des angles de site différents pour les antennes d'incidence et de réception. Ce cas est appelé **multi-statique**. Ce cas utilise les positionneurs de la base sphérique (figure C4b)

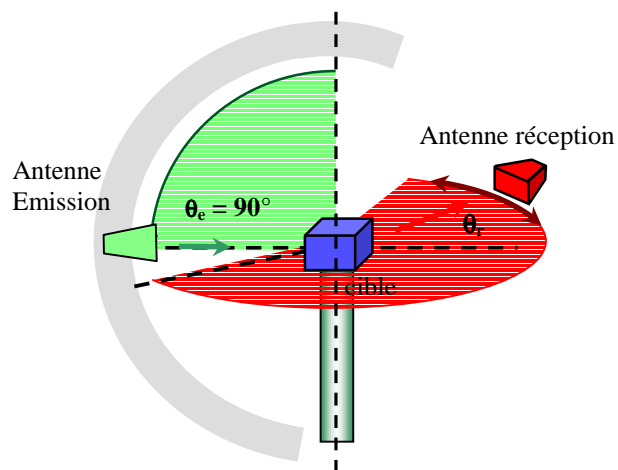


Figure C4a : configuration **bistatique**.

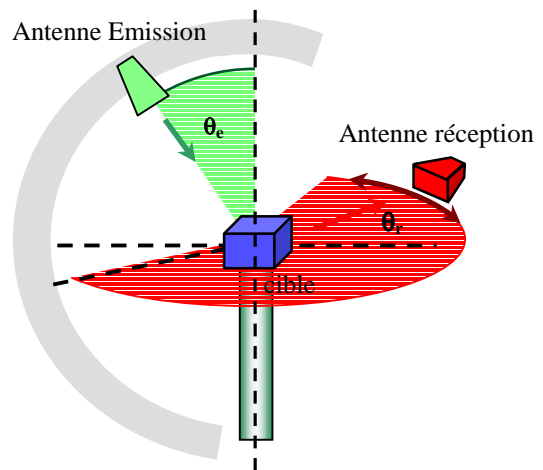


Figure C4b : configuration **multi-statique**.

Remarque : les rôles des antennes (émission ou réception) sont arbitraires et peuvent être intervertis par rapport à la figure.

Annexe D : Caractérisations d'antennes.

Du fait que l'ensemble de la base a été conçu pour proposer un ensemble de possibilités extrêmement variées. Il était logique de prendre en compte la possibilité de caractériser des antennes, quelles soient classiques ou novatrices (prototype de nouveaux concepts d'antennes). En effet, comme nous l'avons déjà indiqué dans le manuscrit, il est relativement simple d'extrapoler une base de mesures de champs diffractés par des cibles quelconques en une base de caractérisations d'antennes.

Les principales caractéristiques des antennes mesurées sont le gain et les diagrammes de directivité. Ces diagrammes sont déterminés dans les plans E et H (ou un autre plan quelconque par exemple 45°) et suivant les deux cas de polarisations : polarisation directe (copolarisation) et polarisation croisée.

A la base, l'Antenne Sous Test, autrement appelée AST, est positionnée (son centre de phase) au centre du positionneur azimutal via un mât support. La rotation est alors appliquée à l'AST. Deux configurations géométriques majeures sont alors observées :

Soit une configuration classique plane avec une distance entre l'AST et l'antenne de références de 10 mètres ou une configuration sphérique à avec la distance inter-antennes de 2 mètres. Dans cette dernière configuration, il est important de considérer la condition de champ proche ou de champ lointain. Du fait que nous ne possédons pas d'outil de transformation dite de champ proche vers le champ lointain, nous considérons que l'antenne sous test est *a priori* en zone de champ lointain. Cette hypothèse, souvent non vérifiée par rapport aux conditions classiques de la littérature[Balanis]²⁶, s'avère dans la majeure partie des études valide.

Pour la détermination du gain, la technique des trois antennes [Ba] est appliquée en utilisant la relation classique (formule de Friis) gérant un bilan de liaison hertzienne :

$$Pr = Pe.G_e.G_r.\left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2$$

Pr est la puissance reçue par l'antenne de réception, Pe est la puissance émise par l'antenne d'émission, Ge et Gr sont les gains respectifs des antennes d'émission et de réception, λ est la longueur d'onde et R est la distance comprise entre les deux antennes.

²⁶ la limite pour la distance de champ lointain est donnée par la relation $d > 2D^2/\lambda$. Où D est la dimension caractéristique la plus grande des antennes utilisées (AST ou de référence).

Pour effectuer la mesure des différents gains, il faut en outre considérer l'ensemble de la liaison en incluant la chaîne de mesures vectorielles. En effet, les mesures de gains sont des mesures absolues, il faut donc connaître le gain de la chaîne pour ensuite le prendre en compte dans l'utilisation des mesures et obtenir les valeurs de gains G_e et G_r . Le gain de la chaîne déterminé par mesure directe entre le coupleur à l'émission et le mélangeur de réception (cf. figure A3) permet la puissance absolue appliquée à l'antenne d'émission. Dans ces conditions, les valeurs de gains seront donc absolues.

Pour la mesure de diagrammes de directivité, une détermination simple de la grandeur S_{21} est effectuée. Il n'est pas nécessaire d'effectuer une référence absolue à l'aide d'une mesure directe comme pour les valeurs de gain. Sur la figure D1, nous avons reporté l'ensemble des informations nécessaires aux déterminations des diagrammes de directivités. Pour plus de clarté, nous avons pris un schéma d'antenne à ouverture rayonnante rectangulaire pour laquelle l'orientation de la polarisation rectiligne est bien identifiée. Nous observons les localisations des plans E et H, mais aussi celui du plan 45° . Ce dernier est un cas peu habituel, mais peut être rencontré suivant le type d'antenne étudié. En outre, nous avons reporté les deux cas de polarisations de l'antenne de réception pour souligner les cas de co-polarisation et de polarisation croisée.

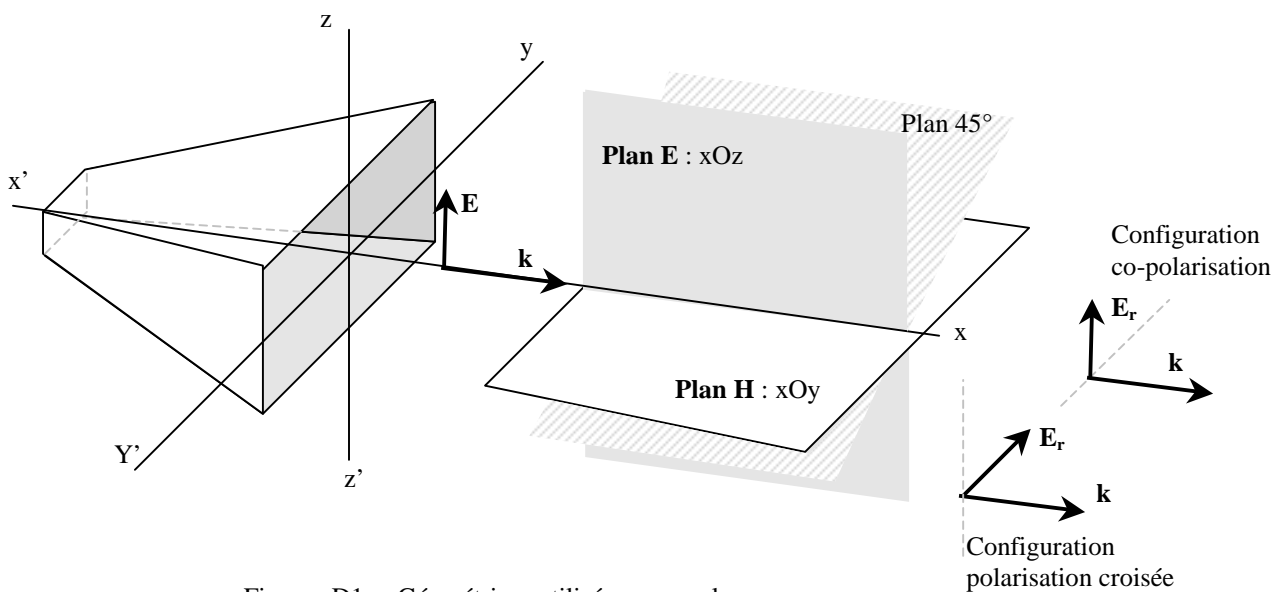


Figure D1: Géométries utilisées pour les caractérisations d'antennes